

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Dipartimento D.I.C.M.A.

Tesi di Laurea in Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie LS

Il monitoraggio e la messa in sicurezza di un'ex-area di cava utilizzata per il recupero di fanghi di cartiera

Tesi di:

RUFFILLI CLAUDIA

Relatore:

Prof. Ing. ALESSANDRA BONOLI

Correlatrici:

Ing. ALICE DALL'ARA

Ing. FEDERICA FERRI

Ing. NORA RAPPOLI

Dott. VALERIO MARRONI

Sessione II

Anno Accademico 2008/2009

Indice

Introduzione	4
1 Inquadramento normativo	8
1.1 Norme in materia di gestione dei rifiuti	8
1.2 Norme in materia di siti contaminati	12
1.3 La disciplina delle bonifiche e dei ripristini ambientali dopo il 2006	17
2 Tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza di biogas.....	19
2.1 Teoria della migrazione del biogas dalle discariche	19
2.1.1 Distanza di migrazione	20
2.1.2 Come il biogas prodotto può entrare all'interno delle costruzioni	21
2.1.3 Rischi di esplosione (explosion hazards).....	22
2.2 Tecniche e tecnologie di bonifica	25
2.2.1 Trattamenti tecnologici di bonifica.....	26
2.2.2 Orientamenti attuali	29
2.2.3 Trattamento biologico (Bioremediation)	31
2.3 Casi di riferimento	35
2.4 Metodologie adottate nella messa in sicurezza permanente di discariche e siti con presenza di biogas.....	36
2.4.1 Discarica di Chivasso – Località Fornace Slet (TO)	36
2.4.2 Discarica di Orbassano – Località Tetti Francesi (TO)	40
2.4.3 Discarica di Alpignano – Località Bruere (TO)	45
3 Caso studio.....	49
3.1 Descrizione del sito: caratterizzazione litostratigrafica e idrogeologica	50
3.1.1 Indagini geognostiche di approfondimento	52
3.1.2 La regimazione idrica subsuperficiale	55
3.2 Caratterizzazione dei fanghi	56
3.2.1 Caratterizzazione chimico-fisica.....	56

3.2.2	Caratterizzazione chimico-fisica dei fanghi del sito “Fondo Colombarotto”	60
3.2.3	Analisi di stabilità	62
3.2.4	Stabilità aerobica ed anaerobica dei fanghi del sito “Fondo Colombarotto”	63
4	Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell’area	66
4.1	Cronistoria del “Fondo Colombarotto”	66
4.2	Interventi di messa in sicurezza effettuati	67
4.2.1	Tipologia di intervento di biostabilizzazione e recupero dell’area	72
4.2.2	Attuazione dell’intervento di stabilizzazione e recupero dell’area	74
4.3	Cronologia del monitoraggio della fase gas	81
4.4	Scelta della tecnologia	83
4.5	Iter amministrativo	88
5	Il monitoraggio della fase gas	93
5.1	Meccanismi di formazione del biogas (CH ₄)	93
5.2	Sistemi di monitoraggio del biogas in discarica	97
5.2.1	Raccolta dei campioni di gas	98
5.2.2	Informazioni dal monitoraggio del gas	98
5.2.3	Pianificazione del monitoraggio del gas	98
5.2.4	Come viene raccolto il gas	99
5.2.5	I sistemi passivi per la raccolta del gas	99
5.2.6	I sistemi attivi per la raccolta del gas	99
5.2.7	Metodi disponibili per il controllo del biogas nel caso in cui questo raggiunga le strutture limitrofe	101
5.2.8	Il controllo della pressione del gas	101
5.2.9	Controllo delle aree di fuga	101
5.3	Il monitoraggio della fase gas nel sito “Fondo Colombarotto”	102
5.3.1	Ubicazione dei punti di monitoraggio	102

5.3.2 Materiali e metodi	104
6 I risultati del monitoraggio	108
6.1 Risultati della sperimentazione nei piezometri (C e G)	108
6.1.1 Risultati della fase pilota (piezometri C)	108
6.1.2 Risultati dell'intervento sperimentale (piezometri G)	111
6.1.3 Andamento nel tempo delle concentrazioni medie dei piezometri.....	114
6.2 Comportamento dei biofiltri (B ed M).....	116
6.2.1 Monitoraggio all'interno dei biofiltri B	116
6.2.2 Monitoraggio all'interno dei biofiltri M	124
6.3 Discussione dei risultati	126
Conclusioni	129
Appendice I.....	133
Appendice II	150
Bibliografia	167
Ringraziamenti.....	173

Introduzione

La presente Tesi si propone di descrivere la problematica ambientale emersa nel dicembre 2005 in un sito oggetto di ripristino ambientale con fanghi di cartiera, il successivo intervento di risanamento, effettuato con tecniche innovative di bioremediation, il sistema di monitoraggio attuato ed i risultati ottenuti.

Il sito in esame denominato “Fondo Colombarotto” è situato in località Piratello del Comune di Imola ed è stato oggetto di attività estrattiva di materiale argilloso negli anni ottanta. In seguito l’area in esame è stata interessata da un ripristino ambientale¹ effettuato ai sensi del Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998 per una superficie di 49.000 m², che aveva previsto l’utilizzo di fanghi provenienti da industria cartaria per 60.000 tonnellate. L’intervento di ripristino è stato effettuato negli anni 2003 e 2004. I fanghi per cui è stato richiesto lo stoccaggio nell’area di ex-cava rientrano nella categoria di “rifiuti speciali non pericolosi” dell’industria cartaria, ai sensi del Decreto Ronchi (D.Lgs. 22/97).

Gli aspetti normativi in materia di gestione dei rifiuti e le norme in materia di siti contaminati vigenti al momento degli eventi considerati nella Tesi sono riportati nel capitolo 1.

Nel Dicembre 2005 si sono verificate a distanza di una settimana due deflagrazioni all’interno di un’abitazione di campagna distante circa 200 m dall’area di ex-cava (Marroni *et al.*, 2006). Dopo gli opportuni accertamenti è stata esclusa l’ipotesi che le deflagrazioni fossero state causate da perdite della rete gas metano. Alcune indagini effettuate, svolte sotto il controllo dell’ARPA ER, hanno dimostrato che l’origine delle deflagrazioni era nella produzione e migrazione di biogas originatosi dal vicino “Fondo Colombarotto” (Bonoli, 2006). In seguito sono state ordinate dal Comune di Imola ed eseguite sotto il controllo dell’ARPA E.R. ulteriori verifiche tecniche sia nell’area di ripristino che nell’intorno, con l’installazione di sonde per la ricerca di biogas e col prelievo di campioni con carotaggi.

¹ Nella documentazione relativa all’attività svolta sull’area in questione viene utilizzata la terminologia “ripristino ambientale”, anche se ai sensi del D.M. 5.02.98 la definizione corretta sarebbe “recupero ambientale”.

Si è appurato che:

1. I fanghi conferiti appartenevano alle tipologie autorizzate;
2. In diversi punti i fanghi non erano stati miscelati con il terreno secondo le percentuali volumetriche stabilite dalla norma di riferimento;
3. La profondità di tombamento era eterogenea, anche di molto superiore a quella dichiarata ed autorizzata, ed arrivava fino a circa -9 m dal p.c.

Sono state misurate elevate concentrazioni di gas metano non solo all'interno dell'area di ripristino ma anche a circa 100 metri di distanza verso diversi bersagli sensibili (abitazioni). L'erronea modalità del tombamento dei fanghi in alcuni punti (miscelazioni con suolo non conforme) ha contribuito in maniera rilevante ad indurre un accelerato processo di degradazione anaerobica della sostanza organica contenuta (prevalentemente cellulosa), determinando la produzione di un'ingente quantità di biogas caratterizzato da elevate concentrazioni di metano (Marroni *et al.*, 2006).

Le indagini effettuate, dunque, hanno dimostrato che il ripristino ambientale non era stato effettuato correttamente; tuttavia, nonostante ciò, i campionamenti eseguiti per verificare i superamenti delle concentrazioni massime sulle matrici acqua e suolo, ai fini di capire se si ricadeva in un Sito Inquinato, ai sensi del Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471, "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni", non hanno riscontrato alcuna contaminazione.

L'intervento di risanamento è stato pertanto condotto con un procedimento amministrativo a carico del comune di Imola, basato sull'emissione di specifiche ordinanze e disposizioni dirigenziali a seguito di specifici Incontri Tecnici tra le Autorità locali (Conferenze di Servizio con: Comune di Imola, AUSL di Imola – Dipartimenti di Sanità Pubblica, Sezione Provinciale ARPA di Bologna – Distretto Territoriale di Imola, di seguito denominata ARPA) ed il gestore dell'intervento di ripristino.

Per quanto riguarda l'intervento di risanamento vero e proprio, che è stato approvato con costi a carico della Ditta C.A.R. autrice del ripristino, si è intervenuti in due tempi: con la messa in sicurezza di emergenza (nel frattempo il sito era sottoposto a sequestro) e con la pianificazione della messa in sicurezza

permanente. Poiché lo scavo ed il conferimento in discarica di 60.000 tonnellate di fanghi, a cui vanno aggiunte paragonabili quantità di terreno miscelato, risultavano estremamente difficoltosi in primo luogo in termini di tempi e di costi (che sarebbero stati ingenti visti i quantitativi da smaltire, ed avrebbero causato il fallimento della ditta) ed in secondo luogo in termini ambientali sanitari di grande impatto per la zona (maleodori, emissioni, rumori, traffico dovuti allo scavo ed al trasporto del materiale), si è cercato in costante relazione con la Procura della Repubblica di garantire una rapida messa in sicurezza e di studiare la fattibilità di un risanamento almeno parziale *in situ*. Per la messa in sicurezza di emergenza dell'area dell'ex-cava è stata pertanto realizzata una trincea perimetrale profonda 7 metri per interrompere od almeno contenere la migrazione di gas verso le abitazioni limitrofe (Bonoli, 2006). Il Comune di Imola in accordo con gli altri Enti ha successivamente ordinato di provvedere alla messa in sicurezza del sito mediante un impianto di aspirazione di biogas SVE (*Soil Vapour Extraction*) e di presentare un progetto di risoluzione delle problematiche verificatesi all'interno dell'ex-cava (Marroni *et al.*, 2006).

Il capitolo 2 descrive le tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza non controllata di biogas, ponendo particolare attenzione alla migrazione verso bersagli esterni del biogas nelle discariche ed alle metodologie utilizzate nella loro messa in sicurezza; riporta inoltre un quadro sintetico delle tecniche e tecnologie di bonifica.

Per la messa in sicurezza permanente del sito e la rinaturalizzazione dello stesso è stato proposto ed approvato un intervento innovativo di tipo fisico-meccanico e biologico all'interno dell'area, che ha permesso anche il recupero ai fini agronomici dell'ex cava e che verrà descritto in dettaglio, unitamente alla cronologia dell'intervento e all'iter tecnico-amministrativo seguito, nel capitolo 4. In precedenza nel capitolo 3 è stata introdotta la descrizione del caso studio della presente Tesi, fornendo la caratterizzazione litostratigrafica e idrogeologica del sito, oltre alla caratterizzazione chimico-fisica ed alle analisi di stabilità dei fanghi di cartiera.

Infine gli ultimi capitoli della Tesi descrivono i materiali ed i metodi utilizzati per l'attività di monitoraggio del biogas condotta in campo, e raccolgono i risultati raggiunti, ai fini di cogliere l'efficacia della tecnologia innovativa attuata nell'area di ex-cava.

La Tesi di Laurea fa parte di un elenco nazionale di tesi/tirocinio ENEA, ed è stata svolta presso il Centro Ricerche di Faenza, Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali, sezione Ingegnerizzazione di Componenti e Processi (correlatrice Ing. Alice Dall'Ara).

Inoltre, la Tesi si è avvalsa del contributo dei correlatori Ing. Federica Ferri (referente dell'Ufficio Ambiente del Comune di Imola), per gli approfondimenti relativi agli aspetti legislativi ed amministrativi, Ing. Nora Rappoli (AMEK Soc. Coop a RL), per la fornitura dei materiali ed il supporto tecnico nelle fasi di monitoraggio e Dott. Valerio Marroni (l'ARPA E.R., Sez. Prov. di Bologna, Distretto di Imola), che ha permesso la consultazione e l'utilizzo della documentazione relativa al "Fondo Colombarotto" e che ha fornito utili indicazioni e suggerimenti.

Infine, si ringraziano la società APICE S.R.L. (responsabile del contratto di bonifica) ed AMEK Società Cooperativa a RL (detentrica della tecnologia) per la disponibilità ad utilizzare i dati e per il supporto fornito.

1 Inquadramento normativo

Argomento di questo capitolo è la normativa di riferimento in materia di rifiuti e gestione di siti contaminati, vigente al momento degli eventi accennati in introduzione e che verranno riportati in modo completo nel capitolo 4.

1.1 Norme in materia di gestione dei rifiuti

Il **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n°22**, “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/61/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio” ² (**Decreto Ronchi**), che fino alla pubblicazione del Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale”, ha rivestito il ruolo di legge quadro in materia di rifiuti, si pone come finalità primaria la riduzione delle quantità di rifiuti prodotta ed, in secondo luogo, il loro massimo riutilizzo.

Successivamente, al fine di normare proprio le procedure di riutilizzo, è stato emanato il **Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998**, “Individuazione rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli art. 31 e 33 del D.Lgs. 5 Febbraio 1997, n°22 (Decreto Ronchi)” ³.

Si precisa che tali norme sono state successivamente abrogate dal Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale” e si ritiene significativo riportare alcune parti delle disposizioni sopra richiamate allo scopo di chiarire il quadro normativo di riferimento al caso studio della presente Tesi.

- Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi)

L'articolo 31 del decreto, premesso che *“le procedure semplificate devono comunque garantire un elevato livello di protezione ambientale e controlli efficaci”*, precisa che: *“con decreti del Ministro dell’Ambiente (...) sono adottate per ciascun tipo di attività le norme, che fissano i tipi e le quantità di rifiuti e le condizioni in base alle quali (...) le attività di recupero di cui*

² SOGU n°38 del 15/02/97

³ SOGU n°88 del 16/04/98

all'allegato C sono sottoposte alle procedure semplificate di cui agli articoli 32 e 33".

L'articolo 33 precisa quelle sono le "operazioni di recupero":

1. A condizione che siano rispettate le norme tecniche e le prescrizioni specifiche adottate ai sensi dei commi 1, 2 e 3 dell'articolo 31, l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti possono essere intraprese decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio di attività alla provincia territorialmente competente.

2. Le condizioni e le norme tecniche di cui al comma 1, in relazione a ciascun tipo di attività, prevedono in particolare:

a) per i rifiuti non pericolosi:

1. le quantità massime impiegabili;

2. la provenienza, i tipi e le caratteristiche dei rifiuti utilizzabili nonché le condizioni specifiche alle quali le attività medesime sono sottoposte alla disciplina prevista dal presente articolo;

3. le prescrizioni necessarie per assicurare che, in relazione ai tipi od alle quantità dei rifiuti ed ai metodi di recupero, i rifiuti stessi siano recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente;

3. La provincia iscrive in un apposito registro le imprese che effettuano la comunicazione di inizio di attività ed entro il termine di cui al comma 1 verifica d'ufficio la sussistenza dei presupposti e dei requisiti richiesti. A tal fine alla comunicazione di inizio di attività è allegata una relazione dalla quale deve risultare:

a) il rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche di cui al comma 1;

b) il possesso dei requisiti soggettivi richiesti per la gestione dei rifiuti;

c) le attività di recupero che si intendono svolgere;

d) stabilimento, capacità di recupero e ciclo di trattamento o di combustione nel quale i rifiuti stessi sono destinati ad essere recuperati;

e) le caratteristiche merceologiche dei prodotti derivanti dai cicli di recupero.

▪ Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998

L'articolo 1 precisa quelli che sono i “*principi generali*”:

1. Le attività, i procedimenti ed i metodi di recupero di ciascuna delle tipologie di rifiuti individuati dal presente decreto non devono costituire un pericolo per la salute dell'uomo e recare pregiudizio all'ambiente ed in particolare non devono:

- a) creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora;*
- b) causare inconvenienti da rumori ed odori;*
- c) danneggiare il paesaggio ed i siti di particolare interesse.*

2. Negli allegati 1, 2 e 3 sono definite le norme tecniche generali che, ai fini del comma 1, individuano i tipi di rifiuto non pericolosi e fissano, per ciascun tipo di rifiuto e per ogni attività e metodo di recupero degli stessi, le condizioni specifiche in base alle quali l'esercizio di tali attività è sottoposto alle procedure semplificate di cui all'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 e successive modifiche ed integrazioni.

4. Le procedure semplificate disciplinate dal presente decreto si applicano esclusivamente alle operazioni di recupero specificate ed ai rifiuti individuati dai rispettivi codici e descritti negli allegati.

L'articolo 5 spiega in cosa consistono le attività di “*recupero ambientale*” e spiega l'utilizzo dei rifiuti nelle attività di questo tipo:

1. Le attività di recupero ambientale individuate nell'allegato, consistono nella restituzione di aree degradate ad usi produttivi o sociali attraverso rimodellamenti morfologici.

2. L'utilizzo dei rifiuti nelle attività di recupero di cui al comma 1 è sottoposto alle procedure semplificate previste dall'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997 n. 22, a condizione che:

- a) i rifiuti non siano pericolosi;*
- b) sia previsto e disciplinato da apposito progetto approvato dall'autorità competente;*
- c) sia effettuato nel rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche previste dal presente decreto per la singola*

tipologia di rifiuto impiegato, nonché nel rispetto del progetto di cui alla lettera b);

d) sia compatibile con le caratteristiche chimico-fisiche, idrogeologiche e geomorfologiche dell'area da recuperare;

d-bis) in ogni caso, il contenuto dei contaminanti sia conforme a quanto previsto dalla legislazione vigente in materia di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, in funzione della specifica destinazione d'uso del sito.

Si riportano nell'Appendice I, presente nella parte finale di questa Tesi, gli articoli completi sopra menzionati, al fine di avere un'idea più precisa del loro contenuto.

Per quanto riguarda i fanghi, in riferimento al caso studio della presente Tesi, essi rientrano nella categoria di “rifiuti speciali non pericolosi” dell'industria cartaria, ai sensi del Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n°22.

In particolare, si fa riferimento all'allegato 1 (*norme tecniche generali per il recupero di materia dai rifiuti non pericolosi*) del Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998 [<http://www.ambiente.it/impresa/legislazione/leggi/1998/dm5-2-98/allegato1/12fanghi.htm>], che al punto 12 mette in evidenza la tipologia dei fanghi che possono essere utilizzati nell'operazione di recupero ambientale, ovvero i fanghi dell'industria cartaria, a cui corrispondono i seguenti codici C.E.R.:

- 03.03.02 Fanghi di recupero da bagni di macerazione;
- 03.03.05 Fanghi prodotti dai processi di disinchiostrazione nel riciclaggio della carta;
- 03.03.09 Fanghi di scarto contenenti carbonato di calcio;
- 03.03.10 Scarti di fibre e fanghi contenenti fibre, riempitivi e prodotti di rivestimento generati da processi di separazione meccanica;
- 03.03.11 Fanghi prodotti da trattamento in loco degli effluenti (diversi da 03.03.10);
- 03.03.99 Rifiuti non specificati altrimenti.

Inoltre vengono evidenziate le caratteristiche del rifiuto (fango palpabile) e le attività di recupero cui possono essere destinati i fanghi, tra cui l'utilizzo per recuperi ambientali [R10].

In questo caso la percentuale di fango utilizzabile in miscela con il terreno non dovrà essere superiore al 30% in peso per fanghi al 27% di sostanza secca. Inoltre, i fanghi dovranno avere le seguenti caratteristiche:

Hg totale < 1,5 mg/kg SS, Cd totale < 1,5 mg/kg SS, Cr VI < 0,5 mg/kg SS, Ni totale < 30 mg/kg SS, Pb totale < 40 mg/kg SS, Cu totale < 150 mg/kg SS, Zn totale < 500 mg/kg SS (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto).

La ditta C.A.R. è iscritta al registro provinciale delle imprese per attività di recupero rifiuti come R10-spandimento sul suolo a beneficio dell'agricoltura di fanghi da industria cartaria; risultava pertanto abilitata allo svolgimento dell'attività di recupero in oggetto.

1.2 Norme in materia di siti contaminati

Le norme di riferimento in vigore al momento dell'inconveniente ambientale verificatosi nel dicembre 2005 erano il **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n°22**, “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/61/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”⁴ (**Decreto Ronchi**), ed il successivo **Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471**, “Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni”.

Si precisa che tali norme sono state successivamente abrogate dal Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale”.

Si riportano di seguito alcuni commi di articoli del Decreto Ronchi e del Decreto Ministeriale 471/99, significativi per il caso studio della presente Tesi (come in precedenza, gli articoli citati sono presenti in forma completa nell'appendice I).

⁴ SOGU n°38 del 15/02/97

- Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi)

Il Decreto Ronchi, all' Articolo 17 (*Bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati da rifiuti*) afferma:

2. Chiunque cagiona, anche in maniera accidentale, il superamento dei limiti di cui al comma 1, lettera a), ovvero determina un pericolo concreto ed attuale di superamento dei limiti medesimi, è tenuto a procedere a proprie spese agli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale delle aree inquinate e degli impianti dai quali deriva il pericolo di inquinamento. A tal fine:

- a) deve essere data, entro 48 ore, notifica al Comune, alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti, nonché agli organi di controllo sanitario e ambientale, della situazione di inquinamento ovvero del pericolo concreto ed attuale di inquinamento del sito;*
- b) entro le quarantotto ore successive alla notifica di cui alla lettera a), deve essere data comunicazione al Comune ed alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti degli interventi di messa in sicurezza adottati per non aggravare la situazione di inquinamento o di pericolo di inquinamento, contenere gli effetti e ridurre il rischio sanitario ed ambientale;*
- c) entro trenta giorni dall'evento che ha determinato l'inquinamento ovvero dalla individuazione della situazione di pericolo, deve essere presentato al Comune ed alla Regione il progetto di bonifica delle aree inquinate.*

4. Il Comune approva il progetto ed autorizza la realizzazione degli interventi previsti entro novanta giorni dalla data di presentazione del progetto medesimo e ne dà comunicazione alla Regione. L'autorizzazione indica le eventuali modifiche ed integrazioni del progetto presentato, ne fissa i tempi, anche intermedi, di esecuzione, e stabilisce le garanzie finanziarie che devono essere prestate a favore della Regione per la realizzazione e l'esercizio degli impianti previsti dal progetto di bonifica medesimo. Se l'intervento di bonifica e di messa in sicurezza riguarda un'area compresa nel territorio di più Comuni il progetto e gli interventi sono approvati ed autorizzati dalla Regione.

6. Qualora la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici in vigore imponga il rispetto di limiti di accettabilità di contaminazione che non possono

essere raggiunti neppure con l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, l'autorizzazione di cui al comma 4 può prescrivere l'adozione di misure di sicurezza volte ad impedire danni derivanti dall'inquinamento residuo, da attuarsi in via prioritaria con l'impiego di tecniche e di ingegneria ambientale, nonché limitazioni temporanee o permanenti all'utilizzo dell'area bonificata rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici vigenti, ovvero particolari modalità per l'utilizzo dell'area medesima. Tali prescrizioni comportano, ove occorra, variazione degli strumenti urbanistici e dei piani territoriali.

11-bis. *Nel caso in cui il sito inquinato sia soggetto a sequestro, l'autorità giudiziaria che lo ha disposto autorizza l'accesso al sito per l'esecuzione degli interventi di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale delle aree, anche al fine di impedire l'ulteriore propagazione degli inquinanti ed il conseguente peggioramento della situazione ambientale.*

13-ter. *Gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale previsti dal presente articolo vengono effettuati indipendentemente dalla tipologia, dalle dimensioni e dalle caratteristiche dei siti inquinati nonché dalla natura degli inquinamenti.*

▪ Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471

L'articolo 1 è relativo al “campo di applicazione”:

1. *Il presente regolamento stabilisce i criteri, le procedure e le modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni. A tal fine disciplina:*

- a- i limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli, delle acque superficiali e delle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti;*
- b- le procedure di riferimento per il prelievo e l'analisi dei campioni;*
- c- i criteri generali per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, nonché per la redazione dei relativi progetti;*

- d- i criteri per le operazioni di bonifica di suoli e falde acquifere che facciano ricorso a batteri, a ceppi batterici mutanti, a stimolanti di batteri naturalmente presenti nel suolo.*

L'articolo 2 introduce importanti “*definizioni*”, tra le quali si ricordano:

- **Sito Inquinato:** *sito che presenta livelli di contaminazione o alterazioni chimiche, fisiche o biologiche del suolo o del sottosuolo o delle acque superficiali o delle acque sotterranee tali da determinare un pericolo per la salute pubblica o per l'ambiente naturale o costruito. Ai fini del presente decreto è inquinato il sito nel quale anche uno solo dei valori di concentrazione delle sostanze inquinanti nel suolo o nel sottosuolo o nelle acque sotterranee o nelle acque superficiali risulta superiore ai valori di concentrazione limite accettabili stabiliti dal presente decreto;*

- **Sito Potenzialmente Inquinato:** *sito nel quale, a causa di specifiche attività antropiche pregresse o in atto, sussiste la possibilità che nel suolo o nel sottosuolo o nelle acque superficiali o nelle acque sotterranee siano presenti sostanze contaminanti in concentrazioni tali da determinare un pericolo per la salute pubblica o per l'ambiente naturale o costruito;*

- **Bonifica:** *l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti od a ridurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti presenti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque superficiali o nelle acque sotterranee ad un livello uguale od inferiore ai valori di concentrazione limite accettabili stabiliti dal presente regolamento;*

- **Messa in sicurezza d'emergenza:** *ogni intervento necessario ed urgente per rimuovere le fonti inquinanti, contenere la diffusione degli inquinanti ed impedire il contatto con le fonti inquinanti presenti nel sito, in attesa degli interventi di bonifica e ripristino ambientale o degli interventi di messa in sicurezza permanente;*

- **Messa in sicurezza permanente:** *insieme degli interventi atti ad isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti qualora le fonti inquinanti siano costituite da rifiuti stoccati e noti, sia possibile procedere alla rimozione degli stessi pur applicando le migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria. In tali casi devono essere previste apposite misure di sicurezza, piani di monitoraggio e*

1. Inquadramento normativo

controllo ed eventuali limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici. I valori di concentrazione delle sostanze inquinanti nelle matrici ambientali influenzate dall'inquinamento derivante dai rifiuti stoccati non devono superare nel suolo, sottosuolo, acque sotterranee ed acque superficiali i valori previsti nell'allegato 1;

*- **Ripristino ambientale**⁵: gli interventi di riqualificazione ambientale e paesaggistica, costituenti complemento degli Interventi di bonifica nei casi in cui sia richiesto, che consentono di recuperare il sito alla effettiva e definitiva, fruibilità per la destinazione d'uso conforme agli strumenti urbanistici in vigore, assicurando la salvaguardia della qualità delle matrici ambientali.*

L'Articolo 6 regola gli “Interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale”:

1. Qualora la fonte inquinante sia costituita da rifiuti stoccati ed il progetto preliminare di cui all'articolo 10 dimostri che, nonostante l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria, non sia possibile la rimozione dei rifiuti stessi, il Comune o, se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, può autorizzare interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale, eventualmente prevedendo interventi di Ingegneria naturalistica.

L'articolo 10 riguarda “l'approvazione del progetto ed autorizzazione degli interventi di bonifica, ripristino ambientale e di messa in sicurezza permanente”.

Infine l'articolo 11 è relativo alla “Progettazione per fasi”.

Nel sito, vista la normativa di riferimento, sono pertanto state effettuate indagini mirate a verificare se vi erano dei superamenti delle concentrazioni massime sulle matrici acqua e suolo, ai fini di capire se si trattava di un Sito Inquinato, ai sensi del DM 471. Tali verifiche non hanno riscontrato alcun superamento.

⁵ Nella documentazione legale relativa all'attività svolta dalla ditta C.A.R.sull'area in questione viene utilizzata la terminologia “ripristino ambientale”, anche se ai sensi del D.M. 5.02.98 la definizione corretta sarebbe “recupero ambientale”. Pertanto nella descrizione del caso specifico ci si adegnerà a quanto riportato nella documentazione ufficiale, per quanto viziata da un uso non corretto dei termini in relazione alla normativa vigente.

Pertanto, non essendoci contaminazione delle matrici suolo e acqua, non si è ricaduti nell'ambito di applicazione del Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471 e in conseguenza di ciò, le indagini e gli interventi sono stati successivamente eseguiti con procedure amministrative specifiche, come verrà spiegato nel paragrafo 4.5.

1.3 La disciplina delle bonifiche e dei ripristini ambientali dopo il 2006

La disciplina della bonifica e del ripristino ambientale dei siti inquinati oggi è dettata dal Titolo V, Parte IV, **Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale”**, dagli articoli 239 al 253 e dall'articolo 257, che regola l'apparato sanzionatorio. Il Titolo V del Testo è stato emanato da parte del Legislatore con finalità di assoluta evidenza quali:

- riordino e coordinamento delle disposizioni di settore attraverso l'individuazione ed abrogazione delle norme incompatibili con la nuova disciplina e la predisposizione di un regime transitorio che fa salve le fonti secondarie vigenti fino all'adozione dei nuovi provvedimenti;
- accelerazione delle operazioni di bonifica mediante snellimento delle procedure relative.

La parte relativa ai principi generali ed alla relativa applicazione della disciplina è contenuta nell'art. 239, che si riferisce alla definizione delle procedure, dei criteri e delle modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie all'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento, da effettuarsi in armonia con i principi e le norme comunitarie, con particolare riferimento al principio “chi inquina paga”. Per quanto concerne la nozione di “**bonifica**”, essa è definita dall'art. 240 lettera p, come “*l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti od a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale od inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio*”.

Le altre definizioni indicate dal Legislatore nella disciplina legislativa sono rappresentate dalla:

- “**messa in sicurezza d'emergenza**”, consistente in “*ogni intervento immediato od a breve termine, da mettere in opera nelle condizioni di*

emergenza (di cui alla lettera t) in caso di eventi di contaminazione repentini di qualsiasi natura, atto a contenere la diffusione delle sorgenti primarie della contaminazione, impedirne il contatto con altre matrici presenti nel sito ed a rimuoverle, in attesa di eventuali ulteriori interventi di bonifica o di messa in sicurezza operativa o permanente”;

- **“messa in sicurezza permanente”**, costituente *“l’insieme degli interventi atti ad isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti ed a garantire un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l’ambiente. In tali casi devono essere previsti piani di monitoraggio e controllo e limitazioni d’uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici”;*
- **“messa in sicurezza operativa”**, ossia *“l’insieme degli interventi eseguiti in un sito con attività in esercizio atti a garantire un adeguato livello di sicurezza per le persone e per l’ambiente, in attesa di ulteriori interventi di messa in sicurezza permanente o bonifica da realizzarsi alla cessazione dell’attività. Essi comprendono altresì gli interventi di contenimento della contaminazione da mettere in atto in via transitoria, fino all’esecuzione della bonifica o della messa in sicurezza permanente, al fine di evitare la diffusione della contaminazione all’interno della stessa matrice o tra matrici differenti. In tali casi devono essere predisposti idonei piani di monitoraggio e controllo che consentano di verificare l’efficacia delle soluzioni adottate”* (Il sole 24 ORE ambiente&sicurezza, 2007).

Si evidenzia che per il caso in esame, non essendo stata rilevata contaminazione nelle matrici acqua e suolo, non si sarebbe comunque ricaduti nell’ambito di applicazione del D.Lgs. 152/2006 (se fosse stato vigente al momento della verifica delle problematiche ambientali) in relazione agli interventi di bonifica.

2 Tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza di biogas

Sulla base delle analisi di letteratura scientifica e di ricerche sul web, casi di esplosioni causate da biogas sono state riscontrate soltanto per discariche e non per ripristini ambientali. Si riepilogano in seguito alcune considerazioni tecniche e casi di riferimento utili per lo studio di questo caso.

2.1 Teoria della migrazione del biogas dalle discariche

La produzione di biogas si osserva sia in discariche di vecchia concezione che in quelle di nuova concezione. Nelle nuove discariche la raccolta ed il convogliamento del biogas è già previsto in fase di progettazione. Nelle vecchie discariche invece non era previsto il suo recupero o non effettuato in maniera corretta, per cui si sono verificati fenomeni di accumulo e migrazione. Le condizioni che influiscono sulla migrazione del biogas sono diverse. Direzione, velocità e distanza di migrazione dipendono da diversi fattori che vengono riportati nel seguito [<http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2.html>]:

- **Tipo di copertura delle discariche.** Se la copertura delle discariche consiste in materiale relativamente permeabile come sabbia o ghiaia, allora il biogas probabilmente migrerà attraverso la copertura. *Se questa invece è rappresentata da limo ed argilla, allora non è molto permeabile ed il gas tenderà a migrare nel sottosuolo in maniera orizzontale.* Se un'area della discarica è più permeabile del resto della stessa, il biogas migrerà attraverso quest'ultima.
- **Vie naturali ed artificiali.** Dreni, trincee, tunnel e condotti sotterranei possono agire come vie preferenziali per la fuga del gas. La naturale conformazione del suolo spesso provvede a creare passaggi naturali attraverso i quali il biogas può migrare, come rocce fratturate, suolo poroso o corsi sotterranei.
- **Velocità e direzione del vento.** Il gas proveniente dalla discarica sfoga in maniera naturale nell'atmosfera e da qui viene poi trasportato dal vento. Il vento diluisce il gas con l'aria e lo sposta su aree che stanno oltre la

discarica. La velocità e la direzione del vento determinano la concentrazione del biogas nell'aria, la quale può variare molto da giorno a giorno, persino da ora ad ora. Ad esempio al mattino presto i venti tendono ad essere più leggeri e provvedono a diluire e disperdere in misura minore il gas nelle aree limitrofe.

- **Umidità.** Una superficie umida può impedire che il gas migri attraverso la parte più alta della discarica. Pioggia ed umidità possono anche filtrare all'interno degli spazi porosi e spingere fuori i gas da questi spazi.
- **Livelli di acqua sotterranea.** Il movimento del gas è influenzato dalle variazioni del livello dell'acqua sotterranea. Se il livello si alza all'interno di un'area, questo forzerà il biogas prodotto a spostarsi verso l'alto.
- **Temperatura.** Gli aumenti di temperatura stimolano il movimento del gas, tendendo anche ad aumentare la sua diffusione, cosicché può diffondersi più velocemente in condizioni calde. La discarica comunque mantiene generalmente una temperatura stabile. I cicli di congelamento e disgelo possono portare la superficie del suolo a rompersi, a fratturarsi, facilitando la migrazione del biogas verso l'alto, oppure in modo orizzontale attraverso vie preferenziali. Il suolo ghiacciato può costituire una barriera fisica alla migrazione del biogas verso l'alto, forzando in questo modo il movimento dello stesso per via orizzontale.
- **Pressione barometrica e pressione del gas nel suolo.** La differenza tra la pressione del biogas nel suolo e la pressione barometrica permette al gas di muoversi od in modo verticale od in quello laterale, a seconda che la pressione barometrica sia più alta o più bassa di quella del biogas nel suolo. Quando la pressione barometrica cala, il biogas tenderà a migrare fuori dalla discarica. Quando la pressione barometrica sale, il gas può rimanere all'interno temporaneamente fino a quando nuovi bilanci di pressione saranno stabiliti.

2.1.1 Distanza di migrazione

Risulta alquanto complicato prevedere la distanza che il biogas prodotto può raggiungere, in quanto molti fattori contribuiscono alla sua capacità di migrazione sotterranea. *Sono comunque state osservate distanze superiori a 450 m.* I modelli

matematici possono predire la distanza di migrazione del gas basandosi su dati raccolti dalle discariche esistenti. Uno studio condotto dal Dipartimento della Salute di New York ha trovato che su 38 discariche il gas era migrato dal sottosuolo fino ad una distanza di oltre 300 m in un caso, di oltre 150 m in 4 casi e soltanto di 75 m negli altri 33 casi (ATSDR, 1998).

2.1.2 Come il biogas prodotto può entrare all'interno delle costruzioni

I gas che migrano da una discarica possono eventualmente raggiungere delle costruzioni e delle case presenti nelle aree limitrofe. Crepe e brecce nelle fondazioni, differenza di pressione tra l'esterno e l'interno della costruzione o della casa, sistemi di ventilazione meccanica e zone in cui ci possono essere delle perdite come giunture, intercapedini, sistemi di scarico ecc., forniscono dei punti di entrata per i gas. ***Le costruzioni e le case con un piano interrato generalmente forniscono l'accesso più semplice per i gas che migrano dal suolo.*** La concentrazione dei gas all'interno di una costruzione o di una casa (*indoor*), dipende dalla progettazione e dalla costruzione della stessa, dal tasso di scambio dei gas con l'aria e dalla distanza dalla discarica.

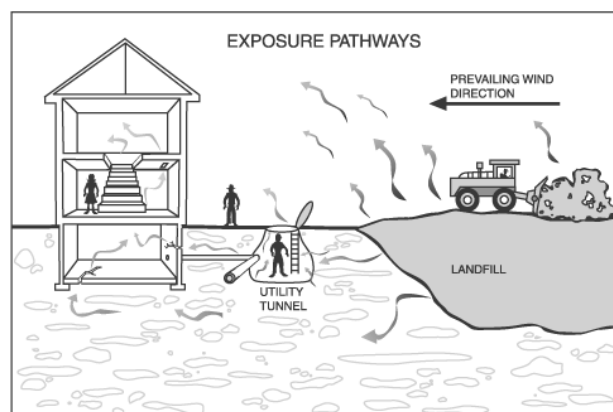


Figura 2. 1: Potenziali vie di conduzione per il biogas prodotto in discarica
[<http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch3.html>]

2.1.3 Rischi di esplosione (explosion hazards)

Il biogas prodotto può formare una miscela esplosiva quando si combina con l'aria secondo certe proporzioni. Nel seguito si riportano le condizioni affinché il gas diventi esplosivo e le tipologie di gas che potenzialmente possono costituire un rischio.

Limite Esplosivo Inferiore e Superiore (LEL ed UEL)

Il livello di concentrazione secondo il quale un gas può potenzialmente esplodere è chiamato limite esplosivo. Il limite esplosivo viene considerato in un *range* che va da un minimo ad un massimo di percentuale di combustibile in aria (o più raramente in altri comburenti), il limite esplosivo inferiore (LEL) ed il limite esplosivo superiore (UEL) [http://it.wikipedia.org/wiki/Limiti_di_esplosione]. Il LEL e l'UEL sono espressi come percentuale in volume di un gas nell'aria. Per concentrazioni inferiori al LEL e superiori all'UEL, un gas non esplode. Il rischio invece può esistere se un gas è presente nell'aria con una concentrazione compresa tra i due limiti ed è presente una fonte di accensione.

I gas che possono costituire un rischio esplosivo sono:

- **Metano.** Il metano è il componente più pericoloso del biogas sotto quest'ottica. Questo gas diventa esplosivo quando si trova ad avere un concentrazione compresa tra il 5% in volume nell'aria (LEL) ed il 15% in volume nell'aria (UEL). Poiché le concentrazioni di metano sono all'interno della discarica tipicamente sul 50% (valore molto più alto dell'UEL), il metano inverosimilmente esplode all'interno della stessa. Non appena migra e si diluisce, la miscela di gas metano può raggiungere livelli esplosivi. L'esplosione necessita di ossigeno non presente nelle zone di produzione di metano, poiché i processi biologici che producono questo gas richiedono un ambiente strettamente anaerobico. Sulla superficie della discarica è presente ossigeno a sufficienza per sostenere un'esplosione, ma solitamente il metano è diffuso in atmosfera con concentrazioni inferiori al 5% in volume (LEL). Perciò per avere un rischio, il metano deve allontanarsi dalla discarica e raggiungere un valore di concentrazione compreso tra il LEL e l'UEL.
- **Altri gas.** Altri costituenti del biogas prodotto in discarica sono infiammabili, come l'ammoniaca, il solfuro di idrogeno ed i Composti Organici Non Metanici (NMOCs). Poiché questi gas sono difficilmente

presenti con valori superiori al loro LEL, raramente sono a rischio esplosione come gas individuali. Ad esempio il benzene diventa esplosivo quando assume un valore compreso tra 1,2% in volume (LEL) ed il 7,8% in volume (UEL), ma è molto improbabile che questo avvenga.

Si riportano in tabella 2.1 i limiti del potenziale esplosivo dei componenti più comuni del biogas.

<i>Componente</i>	<i>Potenziale di Esplosione</i>
Metano	Il metano è altamente esplosivo quando è mescolato con l'aria per una concentrazione in volume compresa tra il 5% (LEL) ed il 15% (UEL). Per concentrazioni inferiori al 5% o superiori al 15% il metano non esplode. In alcune discariche il metano può produrre sufficienti quantitativi che raggiungono all'interno della stessa o nelle strutture vicine livelli esplosivi.
Diossido di Carbonio	Il diossido di carbonio non è infiammabile od esplosivo.
Diossido di Azoto	Il diossido di azoto non è infiammabile od esplosivo.
Ossigeno	L'ossigeno non è infiammabile, ma è necessario al fine delle esplosioni.
Ammoniaca	L'ammoniaca è infiammabile. Il LEL è pari al 15% e l'UEL è uguale al 28%. Tale sostanza comunque difficilmente arriva ad una concentrazione sufficientemente alta per essere a rischio di esplosione.
Solfuro di Idrogeno	Il solfuro di idrogeno è infiammabile. Il suo LEL è uguale al 4% ed il suo UEL è pari al 44%. Comunque in molte discariche questa sostanza difficilmente arriva ad una concentrazione sufficientemente alta per costituire un rischio di esplosione.

Tabella 2. 1: Potenziale esplosivo dei componenti più comuni del biogas prodotto in discarica [<http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch3.html>]

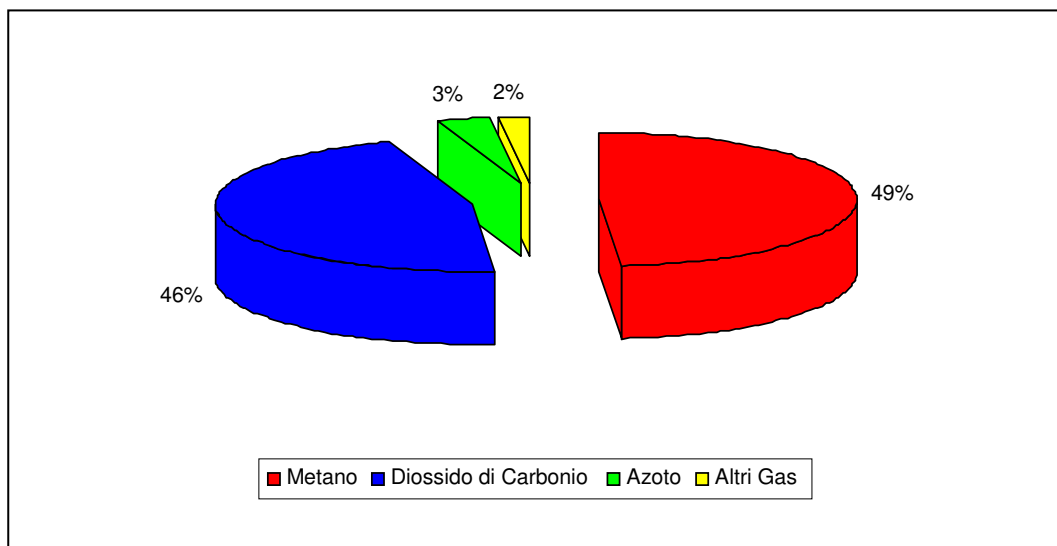


Figura 2.2: Composizione media del biogas prodotto in discarica⁶

[<http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2.html>]

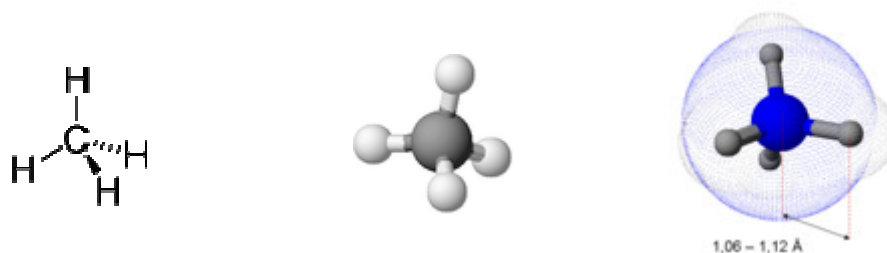


Figura 2. 3: Struttura, modello molecolare e modello 3D del metano

[<http://it.wikipedia.org/wiki/Metano>]

⁶ Dove per Altri Gas si intendono: Ossigeno; Ammoniaca; Composti Organici Non Metanici (NMOCs); solfuri; idrogeno; monossido di carbonio.

2.2 Tecniche e tecnologie di bonifica

Per quanto concerne la nozione di “bonifica” essa è definita dall’articolo 240, Titolo V, parte IV, D.Lgs. 152/2006 (“Testo Unico Ambientale”), come *“l’insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti od a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale od inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio”* (Il sole 24 ORE, 2007).

La bonifica dei suoli contaminati è una materia molto attuale ed in continua evoluzione. Non tutti i progetti di bonifica richiedono gli stessi oneri in termini di costi e di lavoro. L'entità ed il grado di dettaglio dipendono sostanzialmente dalla complessità del sito contaminato. Nel caso di risanamenti urgenti, di piccola entità o là dove le soluzioni sono già note, sono possibili semplificazioni. Nell'ambito della procedura di gestione dei siti contaminati è necessario una costante e reciproca collaborazione tra le parti interessate, al fine di trovare un consenso sulla determinazione dei provvedimenti di bonifica necessari in modo rapido e con efficienza di costi. La decontaminazione di un sito si impone di regola quando la necessità del risanamento è data dalla presenza di composti organici persistenti o metalli pesanti. In molti casi la decontaminazione consiste nella rimozione del materiale inquinato mediante lo scavo ed il suo smaltimento esterno. In questi casi va appurato se è possibile procedere ad una separazione dal materiale delle frazioni di rifiuti combustibili o riciclabili [<http://www.bafu.admin.ch/index.html?lang=it>].

2.2.1 Trattamenti tecnologici di bonifica

È possibile ricondurre i trattamenti tecnologici di bonifica a tre principali tecniche, secondo il modello “Source-Pathway-Target” [<http://www.contaminatedland.co.uk/site-inv/site-001.htm>]:

- 1) Rimozione del suolo contaminato (il “bersaglio”),
- 2) Contenimento/limitazione del contaminante (la “sorgente”),
- 3) Rimozione del contaminante (la “sorgente”).

In particolare:

1) La **rimozione del suolo contaminato** verso la discarica può riguardare:

- Rifiuti inquinati
- Rifiuti pericolosi
- Rifiuti speciali

2) Il **contenimento del contaminante** può avvenire mediante:

- Incapsulamento
 - Pareti di fango
 - Jet grouting, coperture
 - Membrane di argilla o plastica
 - Vetrificazione
 - Cementazione
- Sistema di copertura definitivo (in discarica)

3) La **rimozione del contaminante** è la tecnica di bonifica più vicina al caso studio in esame nella presente Tesi.

Le tecniche disponibili per la decontaminazione del suolo possono essere suddivise in due macrocategorie in base a dove ha luogo l'azione di bonifica (Pavel, Gavrilescu, 2008):

- **tecniche di bonifica *in-situ*,**
- **tecniche di bonifica *ex-situ*.**

Inoltre, a seconda della natura del processo, le tecniche in-situ ed ex-situ possono essere (Pavel, Gavrilescu, 2008):

- **Tecniche Fisico-Chimiche,**
- **Tecniche Termiche,**
- **Tecniche Biologiche.**

Una classificazione analoga delle tecniche di intervento è contenuta nel Prontuario delle Bonifiche, in cui si distingue fra (Il Sole 24 ORE, 2007):

- messa in sicurezza,
- bonifica “*in situ*”,
- bonifica “*on site*”,
- bonifica “*off site*”,
- utilizzo congiunto delle tecniche che precedono,
- bonifiche di amianto.

Sulla base della natura del processo, si introduce in tabella 2.2 una possibile classificazione più completa delle Tecnologie di Intervento per la Bonifica del Suolo, dei sedimenti, dei basamenti rocciosi e del fango, elaborando le informazioni tratte dai siti:

- www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html,
- www.metea.uniba.it/database/tecnologie.htm
(sito del Centro Interdipartimentale di Ricerca sulle Metodologie e Tecnologie Ambientali METEA dell’Università di Bari),
- www.federambiente.it,
- www.contaminatedland.co.uk,
- <http://www.epa.gov/OUST/cat/REMEDIAL.HTM>,

mettendo anche in evidenza se le applicazioni sono eseguite *in situ* o meno.

2. Tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza di biogas

<u>Tecniche fisiche</u>	<u>Tecniche Chimiche</u>	<u>Tecniche Termiche</u>	<u>Tecniche Biologiche</u>	<u>Tecniche Combinate</u>
Soil Vapour Extraction (SVE) (<i>In Situ</i>)	Chemical Flushing (<i>In Situ</i>)	Desorbimento Termico (<i>In Situ, Ex Situ</i>)	Adsorbimento (<i>In Situ</i>)	Lasagna TM
Tecnica Elettrocinetica (<i>In Situ</i>)	Dealogenazione Chimica (<i>Ex Situ</i>)	Incenerimento (<i>Ex Situ</i>)	Attenuazione Naturale o Biorimediazione Intrinseca (<i>In Situ</i>)	Soil Vapour Extraction Thermally Enhanced in Hydraulic Fractures
Lavaggio del Suolo (Soil Washing)	Lavaggio con Solvente (<i>Ex Situ</i>)	Pirolisi (<i>Ex Situ</i>)	Biodenitrificazione (<i>In Situ, Ex Situ</i>)	Phytolytic and Biological Soil Detossification
Soil Steam Injection (<i>In Situ</i>)	Lavaggio del Suolo (Soil Washing)	Soil Vapour Extraction Thermally Enhanced (<i>In Situ</i>)	Biofiltrazione (<i>In Situ</i>)	Soil Vacuum Extraction with Bioremediation
Drum removal	Ossidazione Catalitica	Steam Extraction Enhanced (<i>In Situ</i>)	Biopile (<i>Ex Situ-On Site</i>)	Bioslurping
Evaporation	Ossidazione Chimica (<i>In Situ, Ex Situ</i>)	Vetrificazione (<i>In Situ</i>)	Biosparging (<i>In Situ</i>)	<u>Intervento Fisico-Meccanico e Biologico in situ (Caso Studio)</u>
Vacuum airstripping	Permeable Chemical Treatment Wall (<i>In Situ</i>)	Low-Temperature Thermal Desorption	Bioventing (<i>In Situ</i>)	
<i>Dual-phase extraction</i> (DPE)	Riduzione Chimica (<i>In Situ</i>)		Compostaggio (<i>Ex Situ</i>)	
	Soil Steam Injection (<i>In Situ</i>)		Contattori Biologici Rotanti (<i>Ex Situ</i>)	
	Supercritical Water Oxidation		Fitorimediazione (<i>In Situ</i>)	
	Trattamento Meccano – Chimico (<i>Ex Situ</i>)		Landfarming (<i>Ex Situ-On Site</i>)	
	Trattamento su Carbone Attivo (<i>Ex Situ</i>)		Slurry Bioremediation (<i>Ex Situ</i>)	
	Ossidazione UV		Trattamento Biologico (<i>In Situ</i>) (<i>Bioremediation</i>)	
	Neutralisation		Enhanced Aerobic Bioremediation	
	Photolysis		Filtri Microbiologici (Biobarriera)	
	Ion Exchange			
	Soil Vapour Extraction (SVE) (<i>In Situ</i>)			

Tabella 2. 2: Tecnologie di intervento [elaborato a partire da: <http://www.metea.uniba.it/database/tecnologie.htm>; www.federambiente.it; <http://www.contaminatedland.co.uk>; <http://www.epa.gov/OUST/cat/REMEDIAL.HTM>]

In Appendice II, presente nella parte finale di questa tesi, sono riportate le schede relative alle **tecniche biologiche** elencate nella colonna tre, tratte dal “Rapporto Bonifiche Federambiente 2007”, disponibile on-line al sito [www.federambiente.it].

2.2.2 Orientamenti attuali

Molte delle tecnologie fisico-chimiche e biologiche riportate in tabella sono usate in particolare per la bonifica dei suoli contaminati da metalli pesanti (problema di attuale interesse), così come accertato tramite analisi della letteratura scientifica e ricerche sul web. Marques *et al.* (2009) citano le seguenti tecnologie di bonifica di suoli contaminati da metalli pesanti:

- Soil Washing,
- Soil Vapor Extraction,
- Sol Flushing,
- Solidificazione,
- Stabilizzazione/Immobilizzazione,
- Vetrificazione,
- Electrokinetics,
- Desorbimento Termico,
- Incapsulazione.

Fra esse, ampiamente utilizzato è il *Soil Washing*, del quale esistono diversi tipi di tecnologia e di applicazioni pilota/in scala di campo, applicabili ai suoli altamente inquinati da metalli pesanti: tecniche di separazione fisica, processi di estrazione chimica e processi integrati, che combinano entrambi i metodi fisici e chimici (Dermont *et al.*, 2008).

Tuttavia Marques *et al.* (2009) evidenziano come tali tecnologie risultano costose, lente, dannose per l'ambiente e spesso rendono il terreno inutilizzabile per ulteriori attività, come la crescita di piante. Pertanto ultimamente scienziati ed ingegneri si sono concentrati su tecnologie economicamente sostenibili, che includono l'uso di microrganismi/biomassa o di piante vive, per bonificare le aree inquinate da metalli pesanti (i quali, a differenza dei composti organici, non

possono essere degradati e perciò una bonifica efficace richiede la loro immobilizzazione per ridurre od eliminarne la tossicità). L'ambito di ricerca si è quindi spostato sulle Tecniche Biologiche di Bonifica, e la *Phytoremediation* risulta la tecnologia emergente grazie ai suoi costi operativi, ai vantaggi ambientali dal punto di vista visivo ed all'applicabilità nel lungo termine. In particolare, gli studi condotti negli ultimi anni riportano l'utilizzo della *Phytoremediation* quale alternativa alle attuali tecnologie di intervento nella bonifica dei suoli contaminati da metalli pesanti (Jadia, Fulekar, 2009).

La *Phytoremediation* si avvale dei processi che avvengono in natura, mediante i quali le piante ed i microrganismi contenuti nella loro rizosfera catturano, degradano o immobilizzano gli elementi inquinanti, con lo scopo di bonificare non solo il suolo ma anche le acque, contaminati da composti organici o metalli pesanti; tale tecnologia include varie strategie, riportate di seguito, le quali utilizzano differenti proprietà delle piante (Marques *et al.*, 2009):

- Fitovolatilizzazione (i contaminanti, catturati dalle radici, scorrono attraverso la pianta attraverso le foglie e lì vengono volatilizzati attraverso gli stomi, dove avviene lo scambio di gas),
- Fitostabilizzazione (si utilizzano le piante per ridurre la mobilità e la biodisponibilità degli inquinanti ambientali),
- Fitoestrazione (le radici delle piante catturano i contaminanti e li immagazzinano negli steli e nelle foglie).

Inoltre Luo YM. (2009) evidenzia sei punti di sviluppo e di ricerca nel settore del risanamento dei suoli:

- 1) *green and environmentally-friendly bioremediation*,
- 2) *combined and hybride remediation*,
- 3) *in-situ remediation*,
- 4) *environmentally functional material based remediation*,
- 5) *equipment based site remediation*,
- 6) sistemi di supporto alla scelta della tecnologia e valutazione/accertamento post-risanamento.

Infine, un'ulteriore tendenza nella decontaminazione di matrici solide e liquide da sostanze pericolose è rappresentata dall'estrazione condotta con fluidi in condizioni supercritiche, la quale costituisce un'alternativa rispetto alle tradizionali Tecniche Termiche di Bonifica, come per esempio il desorbimento termico. L'utilizzo di fluidi in condizioni supercritiche, quali mezzo di estrazione per rimuovere vari tipi di sostanze da differenti tipologie di matrici solide e liquide, viene preferito ai metodi convenzionali a causa della possibilità di variare con continuità il potere solvente di tale fluido (mediante modeste variazioni di pressione e/o temperatura) ed alla relativa eliminazione del solvente organico, riducendo i tempi e i costi della successiva depurazione (Sunarso, Ismadji, 2009).

2.2.3 Trattamento biologico (Bioremediation)

La Biorimediazione *In Situ* (*In Situ Bioremediation*), consiste nell'uso di microrganismi indigeni, eterotrofi, aerobici ed anaerobici (Boopathy, 2000), per degradare contaminanti con lo scopo finale di ottenere prodotti chimici innocui. Tale tecnologia è applicata nei suoli e nell'acqua ed è una delle alternative meno costose e più efficienti al metodo standard "pompa e tratta" (*pump and treat*), usato per pulire gli acquiferi ed i suoli contaminati da solventi clorurati, idrocarburi combustibili, esplosivi, nitrati e metalli tossici [http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm]. Il contaminante in questo caso viene visto come fonte di energia per i microrganismi. Il risultato di ogni processo di degradazione dipende dalla popolazione microbica (concentrazione della biomassa, diversità della popolazione, attività degli enzimi), dal substrato (caratteristiche fisico chimiche, strutture molecolari, concentrazione) e da un insieme di fattori ambientali (pH, temperatura, contenuto di umidità, Eh, capacità degli accettori di elettroni, carbonio e fonti di energia) (Boopathy, 2000). Alcuni inquinanti come gli idrocarburi combustibili vengono degradati per via aerobica, altri come il carbonio tetracloride per via anaerobica ed altri possono essere degradati sotto entrambe le condizioni come il tricloroetano [http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm].

La Biorimediazione *In Situ* Accelerata (*Accelerated In Situ Bioremediation*), consiste nell'aggiungere substrato o nutrienti, ossigeno od altri ammendanti ad un acquifero per stimolare la crescita di un target di consorzio di batteri

[http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm]. Generalmente questi sono indigeni, ma possono essere introdotti all'interno dell'acquifero colture di funghi, batteri ed altri microbi [<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html>] provenienti da altri siti competenti, in numero sufficiente per completare il processo di biodegradazione (*bioaugmentation*). La biorimediazione accelerata è usata laddove si desidera aumentare il rateo di biotrasformazione del contaminante. Il tipo di correzione richiesta dipende dal target metabolico dell'inquinante presente. Questa tecnica richiede soltanto l'aggiunta di ossigeno, mentre quella anaerobica spesso richiede l'aggiunta in contemporanea di un donatore di elettroni (lattato o benzoato ad esempio), e di un accettore di elettroni (nitrato o solfato ad esempio). I solventi clorurati spesso richiedono l'adozione di un substrato di carbone per stimolare la dechlorazione riduttiva. L'obiettivo della biorimediazione *in situ* accelerata è quello di aumentare la biomassa per tutto il volume dell'acquifero occupato dal contaminante, per la realizzazione effettiva della biodegradazione di contaminanti disciolti ed adsorbiti.

Tra i due trattamenti tecnologici sicuramente la biorimediazione accelerata è quella che degrada più velocemente il contaminante presente, ma è anche quella che presenta un maggiore investimento in materiali, equipaggiamento e mano d'opera [http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm].

Vantaggi

- I contaminanti possono trasformarsi completamente in sostanze innocue, come il diossido di carbonio, l'acqua o l'etano.
- Il tempo richiesto per trattare l'inquinamento del sottosuolo usando la biorimediazione può essere spesso più veloce dei trattamenti "pompa e tratta" (*pump and treat*).
- Il costo è spesso più basso rispetto alle altre opzioni correttive.
- L'area di trattamento interessata può essere maggiore rispetto a quella delle altre tecnologie, perché il trattamento può raggiungere aree che altrimenti potrebbero essere inaccessibili.

Limiti

- I limiti dipendono dal particolare sito, per cui alcuni contaminanti potrebbero non trasformarsi completamente in prodotti innocui.

- Se la biotrasformazione si ferma ad un composto intermedio, questo potrebbe essere più tossico e/o più mobile del precedente.
- Alcuni contaminanti non si biodegradano (recalcitranti).
- Quando applicata in maniera inappropriata, i pozzi di iniezione si possono bloccare a causa dell'abbondante crescita microbica risultata dall'aggiunta di nutrienti, di donatori di elettroni e/o di accettori di elettroni.
- La biorimediazione accelerata è difficile da implementare negli acquiferi a bassa permeabilità, perché il trasporto degli additivi nutrienti è limitato.
- Metalli pesanti e concentrazioni tossiche di composti organici possono inibire l'attività dei microrganismi indigeni.
- La biorimediazione solitamente richiede una popolazione acclimata di microrganismi che può non svilupparsi per contaminazioni recenti o per composti recalcitranti [http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm].
- Le basse temperature rallentano il processo di rimediazione. I manti caldi del terreno possono essere usati per coprire la superficie del suolo, in modo da incrementare la temperatura ed il rateo di degradazione [<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html>].
- La durata del tempo richiesto per il trattamento può variare da sei mesi a cinque anni e dipende da molti fattori specifici del sito in esame [<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html>].

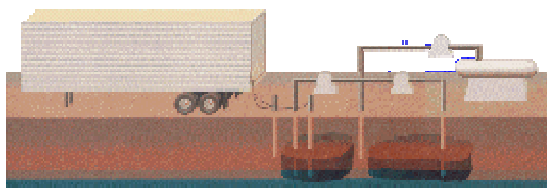


Figura 2. 4: Schematizzazione del Trattamento Biologico (bioremediation)

[http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm]

Si riportano in Tabella 2.3 i principali fattori che influenzano la bioremediation:

Fattori microbici	<ul style="list-style-type: none"> - Crescita fino a che la biomassa critica non è stata raggiunta; - Mutazione e trasferimento del gene per via orizzontale; - Induzione di enzimi; - Arricchimento della capacità della popolazione microbica; - Produzione di metaboliti tossici.
Fattori ambientali	<ul style="list-style-type: none"> - Svuotamento dei substrati preferenziali; - Scarsità dei nutrienti; - Condizioni ambientali inibitrici.
Substrato	<ul style="list-style-type: none"> - Troppo bassa la concentrazione dei contaminanti; - Struttura chimica dei contaminanti; - Tossicità dei contaminanti; - Solubilità dei contaminanti.
Processi biologici aerobici ed anaerobici	<ul style="list-style-type: none"> - Potenziale di ossido\riduzione; - Disponibilità degli accettori di elettroni; - Popolazione microbica presente nel sito.
Crescita del substrato e co-metabolismo	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo di contaminanti; - Concentrazione; - Fonti alternative di carbonio presenti; - Interazioni microbiche (competizione, successione e predazione).
Biodisponibilità fisico-chimica degli inquinanti	<ul style="list-style-type: none"> - Equilibrio d'assorbimento; - Assorbimento irreversibile; - Incorporazione all'interno di sostanze umiche.
Limitazioni al trasferimento di massa	<ul style="list-style-type: none"> - Diffusione dell'ossigeno e solubilità; - Diffusione dei nutrienti; - Solubilità/miscibilità in/con l'acqua.

Tabella 2. 3: Fattori principali che influiscono sulla bioremediation (Boopathy, 2000)

2.3 Casi di riferimento

Benché le esplosioni provocate da biogas prodotto in discarica non avvengono comunemente, un numero di incidenti accertati o sospetti è stato documentato nel corso degli anni. Si riporta in tabella 2.4 un elenco di esplosioni documentate a partire dalla fine degli anni sessanta negli Stati Uniti.

1999	Una bambina di 8 anni ha riportato delle ustioni in seguito a deflagrazioni mentre giocava in un cortile ad Atlanta. Si ipotizzò che l'area era stata utilizzata in passato come una discarica di rifiuti (Atlanta Journal-Constitution 1999).
1994	Mentre giocava a calcio in un parco costruito sopra ad una vecchia discarica a Charlotte nel Nord Carolina, una donna è stata seriamente ferita da un'esplosione di metano (Charlotte Observer 1994).
1987	Una migrazione di gas fuori sito è stata sospettata di aver causato l'esplosione di una casa a Pittsburgh in Pennsylvania (EPA 1991).
1984	Una migrazione di biogas da una discarica ha distrutto una casa nelle vicinanze della stessa ad Akron in Ohio. Dieci case furono temporaneamente evacuate (EPA 1991).
1983	Un'esplosione ha distrutto un residence dall'altra parte della strada di una discarica in Cincinnati, Ohio (EPA 1991).
1975	A Sheridan, Colorado, del biogas si è accumulato all'interno di un tubo di una fogna che attraversava una discarica. Un'esplosione è avvenuta quando dei bambini, mentre giocavano all'interno della tubatura, hanno acceso una candela (USACE 1984).
1969	Gas metano è migrato da un'adiacente discarica all'interno di uno scantinato di un'armeria a Winston-Salem nel Nord Carolina. Una sigaretta accesa ha causato l'esplosione del gas (USACE 1984).

Tabella 2. 4: Esplosioni provocate da biogas prodotto in discarica

[<http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch3.html>]

2.4 Metodologie adottate nella messa in sicurezza permanente di discariche e siti con presenza di biogas

Come accennato all'inizio del capitolo, sulla base delle analisi di letteratura scientifica e di ricerche sul web, casi di esplosioni causate da biogas sono state riscontrate soltanto per discariche e non per ripristini ambientali.

Di seguito vengono riportati dei casi specifici di migrazione di biogas da discariche, e le relative metodologie adottate per l'intervento di messa in sicurezza delle aree interessate [<http://www.provincia.torino.it/ambiente>].

2.4.1 Discarica di Chivasso – Località Fornace Slet (TO)

Ubicazione del sito

Il sito è ubicato in Comune di Chivasso (TO), località Fornace Slet, all'interno di una cava dismessa oggetto di passate attività estrattive per laterizi; insiste su un'area pianeggiante e si trova ad un'altitudine media di circa 210 m sul livello del mare (s.l.m.). Il sito è occupato da diversi lotti di discarica: Chivasso 0 - Chivasso 1 - Chivasso 2, discariche per rifiuti urbani e assimilabili, ormai esaurite (oggetto della presente ricognizione) e Chivasso 3 (attualmente in esercizio, cui sono conferiti solo rifiuti speciali non pericolosi - rifiuti speciali assimilabili [RSAU] prodotti dalle aziende e provenienti da impianti di selezione esterni ed in dotazione all'Azienda). Tutti i lotti di discarica sono gestiti dalla Smaltimenti Controllati S.M.C. S.p.A, titolare delle autorizzazioni, fatta eccezione per la Chivasso 0. Per quanto concerne l'accessibilità del sito, è possibile individuare in prossimità dell'area la presenza di due importanti vie di transito, le autostrade A4 Torino – Milano e A5 Torino – Aosta. Il sito è inoltre facilmente raggiungibile in virtù della vicinanza alle strade statali n. 11 detta “Padana superiore”, n. 26 detta “della Valle d'Aosta” e n. 31 bis detta “Monferrato”.

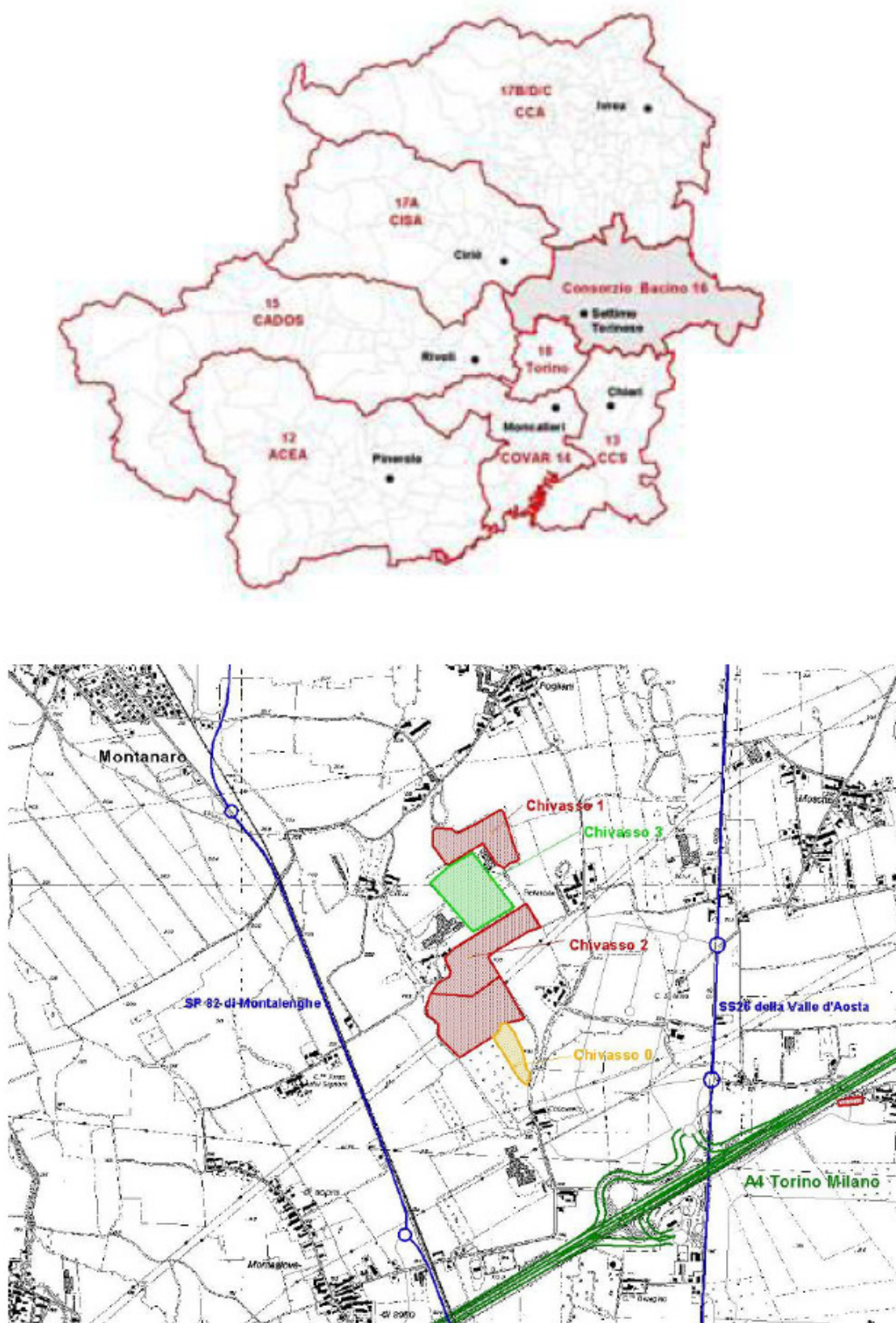


Figura 2. 5: Ubicazione della discarica di Chivasso, Regione Pozzo

La discarica di Chivasso, vecchia ormai di circa una trentina di anni, autorizzata per 2.500.000 m³, ha subito nel 2005 un ulteriore ampliamento autorizzato per un volume di 264.186 m³. Il conferimento di rifiuti ammontava al 31 Dicembre 2005 a 88.409 tonnellate, per una capacità residua di 77.000 m³.

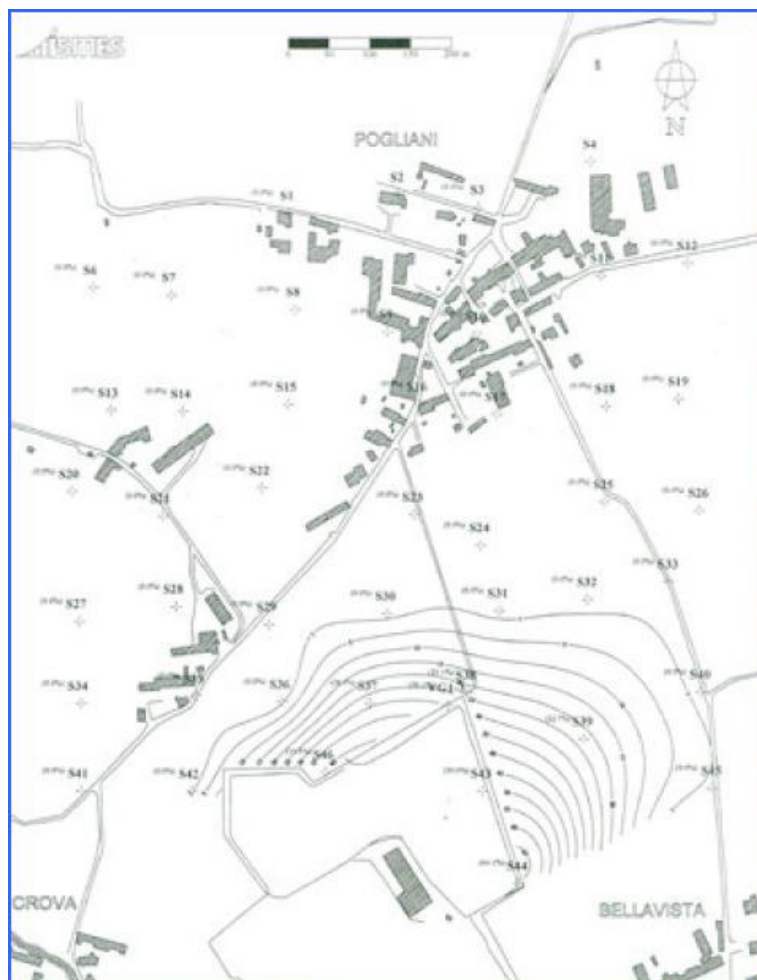


Figura 2. 6: Discarica di Chivasso [<http://www.federambiente.it>]

Problematiche ambientali

Nel dicembre del 1993 si verificava un'esplosione presso un locale sotterraneo annesso ad un'abitazione sita in località Pogliani, circa a 500 m a nord del sito di discarica, provocata da fughe di biogas dalla discarica. Fu a seguito di tale problema che si dispose la chiusura di Chivasso 1 (marzo 1995), trasferendo la volumetria residua a sua disposizione nella vasca per RSU di Chivasso 2. Con Determina n. 33 del 19/10/1995, la Provincia di Torino prescriveva delle modifiche all'impianto di captazione del biogas della vasca di Chivasso 2 e la

realizzazione nella vasca Chivasso 1 di n. 5 pozzi di captazione del biogas. Dal 2001, i risultati analitici delle acque sotterranee prelevate presso il sistema di monitoraggio ad esse dedicato e le cui analisi, da effettuare a cadenza bimestrale, erano state prescritte con l'atto autorizzativo di Chivasso 3 del 2000, evidenziavano il superamento dei VCLA (Valori delle Concentrazioni Limite Ammissibile) indicati dal DM 471/99, per i parametri ferro, nichel e manganese, nonché il superamento delle concentrazioni previste dal D.lgs. 31/01, relative alla qualità delle acque destinate al consumo umano per il parametro ammoniaca. Con DGP n. 165-190789 del 29/09/2002, visto il persistere del superamento dei parametri ammoniaca, ferro, manganese e nichel, si prescriveva l'esecuzione di immediati interventi di messa in sicurezza atti ad evitare la diffusione di contaminanti dal sito e la trasmissione di una relazione mensile sullo stato di avanzamento dei medesimi. In adempimento a tale prescrizione la SMC ha proposto un piano di intervento, prevedendo l'attivazione di pozzi di spurgo e l'adozione di un protocollo di monitoraggio finalizzato alla acquisizione di una serie di dati per la valutazione degli effetti indotti sull'acquifero. La discarica, già dotata di una rete di monitoraggio della falda freatica superficiale costituita da 15 pozzi piezometrici, viene dotata di 6 pozzi di spurgo ubicati sul lato sud di Chivasso 1 e a sud di Chivasso 2. Nel 2005, il Sindaco del Comune di Chivasso, con Ordinanza n. 109/05 del 30/03/2005 inviata

alla SMC, richiedeva la predisposizione di un Piano di caratterizzazione ai sensi dell'art.10 del DM 471/99. La fonte di contaminazione è individuata nel rilascio di percolato prodotto dai rifiuti abbancati. I principali contaminanti presenti nel percolato e segnalati nelle acque sotterranee in concentrazioni superiori ai limiti fissati dal DM 471/99 e dal D.lgs. 31/01, sono l'ammoniaca, il ferro, il manganese e il nichel. Durante la redazione del progetto definitivo di bonifica la rete dei piezometri è stata incrementata portando i piezometri a n. 23 superficiali (circa 20 m da p.c.) e n. 3 profondi (circa 60 m da p.c.). Il percorso di migrazione del percolato e delle sostanze contaminanti in esso contenute comporta il trasporto in soluzione dei composti inquinanti in falda con potenziale ingestione diretta (uso potabile) o indiretta (uso agricolo) di acqua contaminata da parte di chi opera nei suoli agricoli esterni al sito. E' attualmente in corso la procedura di approvazione

della documentazione progettuale inerente la bonifica delle matrici ambientali inquinate da parte del comune di Chivasso.

Mediante indagini con l'installazione di 45 punti di campionamento intorno alla discarica e misure di biogas (metano, anidride carbonica, ossigeno) è stata rilevata la sua presenza nel terreno tra la discarica e l'abitato a 500 m di distanza, con concentrazioni di metano fino al 60% in volume. L'intervento di bonifica è stato realizzato dal CESI nell'anno 2005.

Intervento:

- Realizzazione di una rete di 20 pozzi di pompaggio disposti in 3 batterie, con sistema di aspirazione e combustione dei gas;
- Controllo e regolazione del sistema (pressione di aspirazione, ecc.);
- Misure della concentrazione del gas nel terreno per verificare l'avanzamento della bonifica.

Esito dell'intervento:

- Progressiva diminuzione di metano nei terreni circostanti la discarica;
- Dopo alcuni mesi il metano interessava solo la fascia più prossima alla discarica;
- Bonificate tutte le aree in prossimità delle abitazioni.

2.4.2 Discarica di Orbassano – Località Tetti Francesi (TO)

Ubicazione del sito

La discarica per rifiuti speciali assimilabili agli urbani di Orbassano sorge a sud-est del centro abitato, in località Tetti Francesi.

Cronistoria della discarica

La discarica di Orbassano è stata autorizzata con DGR 185-37587 del 30/04/1990 ed è stata attiva su istanza presentata, ai sensi dell'ex art.3 bis della legge 441 del 29/10/87, dal Consorzio Torino Sud. Si tratta di una discarica di prima categoria per rifiuti speciali assimilabili agli urbani non putrescibili. La costruzione e la gestione dell'impianto è stata effettuata dalla Società SMC SpA Smaltimenti Controllati, quale soggetto titolare della disponibilità del sito. Il progetto approvato è caratterizzato da due lotti corrispondenti ad altrettanti fasi di costruzione della discarica. La coltivazione dell'impianto si è svolta dal giugno

1990 al giugno 1992 ed ha consentito lo smaltimento di circa 140.000 m³ di rifiuti speciali assimilabili agli urbani non putrescibili.

Caratteristiche dell'impianto

L'impianto risulta essere realizzato prevalentemente in invaso ad eccezione di una modesta porzione di volume abbancata in rilevato e sagomata a dislivello al fine di allontanare le acque meteoriche. La superficie totale della discarica è di 18.872 m². Il Lotto 1 ha una volumetria di 71.440 m³, il Lotto 2 di 70.328 m³ e la sopraelevazione di 55.000 m³ per un totale di 196.768 m³ su una superficie di 18.872 m². Il fondo della discarica per entrambi i lotti è caratterizzato da una profondità massima di 16 metri circa rispetto al piano campagna (ovvero a 259 m slm mentre il piano campagna è a 274-276 m slm). Le sponde della vasca, inclinate di 33° rispetto all'orizzontale, sono state realizzate mediante materiale misto granulare sul quale è stata posata una geomembrana di PEAD dello spessore di 2 mm, non è presente invece lo strato di impermeabilizzazione in argilla.

L'impermeabilizzazione di fondo differisce per le due vasche: il lotto 1 ha uno spessore di argilla di 100 cm, una geomembrana in PEAD di 2 mm e uno strato di drenaggio del percolato di 30 cm.

Il lotto 2 ha uno spessore di argilla di 30 cm, uno strato di geocomposito di 6 mm, uno strato di sabbia di monitoraggio di 30 cm, una geomembrana in PEAD di 2 mm ed uno strato di drenaggio del percolato di 30 cm. La gestione del biogas è organizzata su un sistema di captazione costituito da 9 pozzi ad asse verticale collegati in serie tramite 2 collettori ad un sistema di estrazione forzata da 150 Nm³/h. Il biogas estratto non viene recuperato energeticamente ma avviato ad una torcia a fiamma libera. Tale impianto è stato realizzato nel 1995. Il percolato estratto è smaltito in un impianto di trattamento esterno.

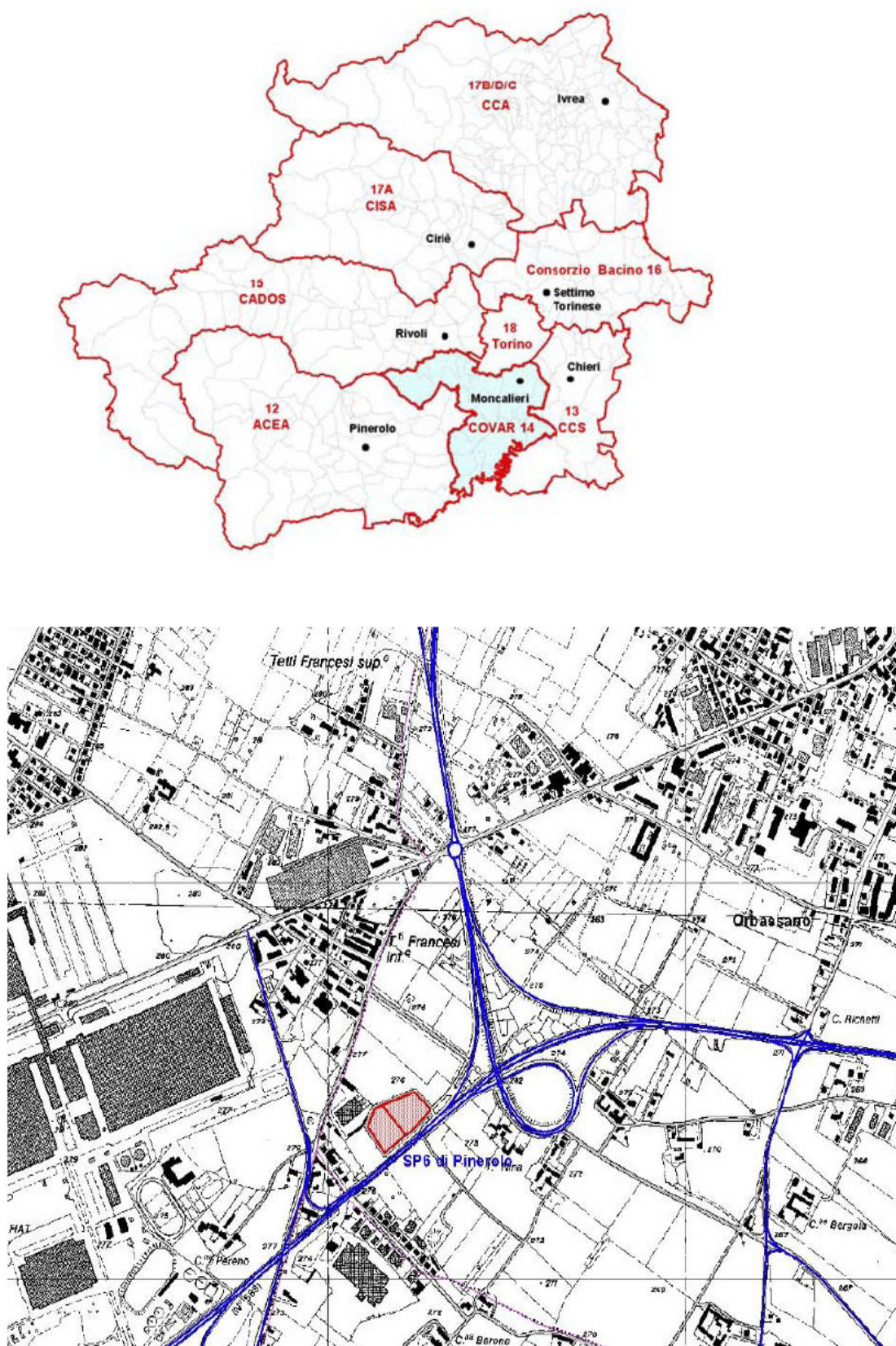


Figura 2. 7: Ubicazione della discarica di RSA sita in località Tetti Francesi

Problematiche ambientali

L'assenza di uno strato di argilla sulle sponde ha generato fenomeni di migrazione di gas nello strato insaturo all'esterno delle vasche. Per tale ragione nel settembre 1999 il Consorzio Intercomunale Torino Sud ha presentato il Progetto di un sistema di monitoraggio per il controllo della presenza di biogas nel sottosuolo non saturo circostante la discarica. Il Progetto è stato redatto dalla Società proprietaria dell'impianto, la SMC SpA Smaltimenti Controllati. Problematiche presenti:

- migrazione di biogas,
- inquinamento delle acque sotterranee per presenza di manganese, azoto ammoniacale e ferro.

Per quest'ultime, è stata attivata la procedura di bonifica ai sensi del dm 471/99, attualmente in corso.

Prescrizioni della Provincia di Torino

Con Decreto del Dirigente del Servizio Gestione Rifiuti e Inquinamento del Suolo n. 58-65000/1999 veniva prescritta la progettazione e l'allestimento di un sistema di monitoraggio per il controllo della presenza del biogas nel sottosuolo non saturo circostante alla discarica esaurita e una relazione riassuntiva circa lo stato di fatto del sistema di monitoraggio delle acque sotterranee esistente presso la discarica. Con lo stesso Decreto del Dirigente veniva inoltre disposto l'invio periodico degli esiti dei rilievi fatti presso il sistema di monitoraggio del biogas e di monitoraggio delle acque sotterranee nonché l'invio annuale di una relazione riassuntiva di tutti i dati relativi ai monitoraggi (vedi tabella 2.5).

2. Tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza di biogas

discarica di Orbassano	parametri		Punto di prelievo	frequenza misurazione/ analisi	frequenza trasmissione dati
Monitoraggio biogas	CH ₄ (%), CO ₂ (%), O ₂ (%), L.E.L. (%), pressione del gas rispetto all'esterno (mmH ₂ O), temperatura atmosferica (°C), pressione atmosferica (mbar)		20	quadrimestrale	quadrimestrale
Monitoraggio acque sotterranee	determinati in situ	soggiacenza falda in m. s.l.m., temperatura della acque di falda (°C), potenziale redox (Eh, mV), temperatura atmosferica (°C)	7	semestrale	semestrale
	registrati in situ	data e ora di campionamento, nome o sigla dell'operatore, condizioni meteo generali al momento del campionamento, durata e portata dello spurgo preliminare del pozzo, portata di campionamento, profondità di campionamento, aspetto del campione (colore, odore, torbidità), metodo dettagliato di conservazione del campione.			
	determinati in laboratorio	conducibilità elettrica (S/cm), pH, alcalinità (mg/l CaCO ₃), durezza totale (°F), cloruri (mg/l Cl), azoto ammoniacale (mg/l NH ₄), solfati (mg/l SO ₄), ferro (mg/l Fe), manganese (mg/l Mn), nichel (mg/l Ni).			

Tabella 2. 5: Prescrizioni ambientali relative alla discarica di Orbassano

2.4.3 Discarica di Alpignano – Località Bruere (TO)

Ubicazione

La discarica è localizzata nel territorio del comune di Alpignano, lungo le sponde della Dora Riparia, in località Bruere, al confine con il comune di Pianezza, poco distante dai centri abitati di Pianezza e Alpignano. Tale area è inoltre contigua agli stabilimenti in disuso del Cotonificio Valsusa. L'accesso al sito è garantito da una strada di servizio che si innesta sulla SP 177 di Val della Torre (Strada provinciale Collegno-Alpignano).

Cronistoria della discarica

La discarica è stata autorizzata con DGR 35-28718 dell'11/10/1983 per una volumetria complessiva di circa 500.000 m³. La coltivazione era iniziata nel 1974; l'impianto è stata chiuso nel giugno 1988. La titolarità dell'autorizzazione è in capo a CIDIU SpA. La discarica è costituita da tre lotti realizzati in periodi successivi e con tecnologie adeguate al periodo di costruzione. In particolare il corpo centrale della discarica, in esercizio dal 1974 al 1984, era allestito senza alcun sistema di impermeabilizzazione artificiale ma si basava per la protezione contro le diffusioni da percolato, esclusivamente sullo strato argilloso naturale dello spessore di circa 6 metri. Nel periodo dal 1984 al 1987 venne allestito e coltivato il settore di discarica ubicato all'estremità nord, l'unico che ricade su terreni in totale disponibilità del CIDIU; tale settore venne dotato di un telo in HDPE sovrapposto allo strato di argilla già presente. Nel periodo 1987-1988 venne realizzato e coltivato un piccolo settore all'estremità sud munito di impermeabilizzazione in HDPE e di sistema di drenaggio e raccolta del percolato.

Caratteristiche dell'impianto

L'area della discarica ha una superficie di circa 69.000 m²; si presenta come una piramide tronca a base irregolare. La quota massima del corpo discarica è pari a circa 320 m s.l.m.; quella minore è di circa 300 m s.l.m. Nel 1986 il sistema di raccolta del percolato del lotto 1 viene integrato mediante una trincea drenante ed alcuni pozzi allo scopo di contenere il percolato che defluiva lateralmente verso est da dove fuoriusciva verso la Dora. Il percolato estratto è inviato tramite fognatura ad impianto di depurazione per scarichi civili. Il biogas captato dai 12

pozzi distribuiti sulla superficie viene aspirato da due centraline di regolazione; da qui inviato in una centralina di combustione.

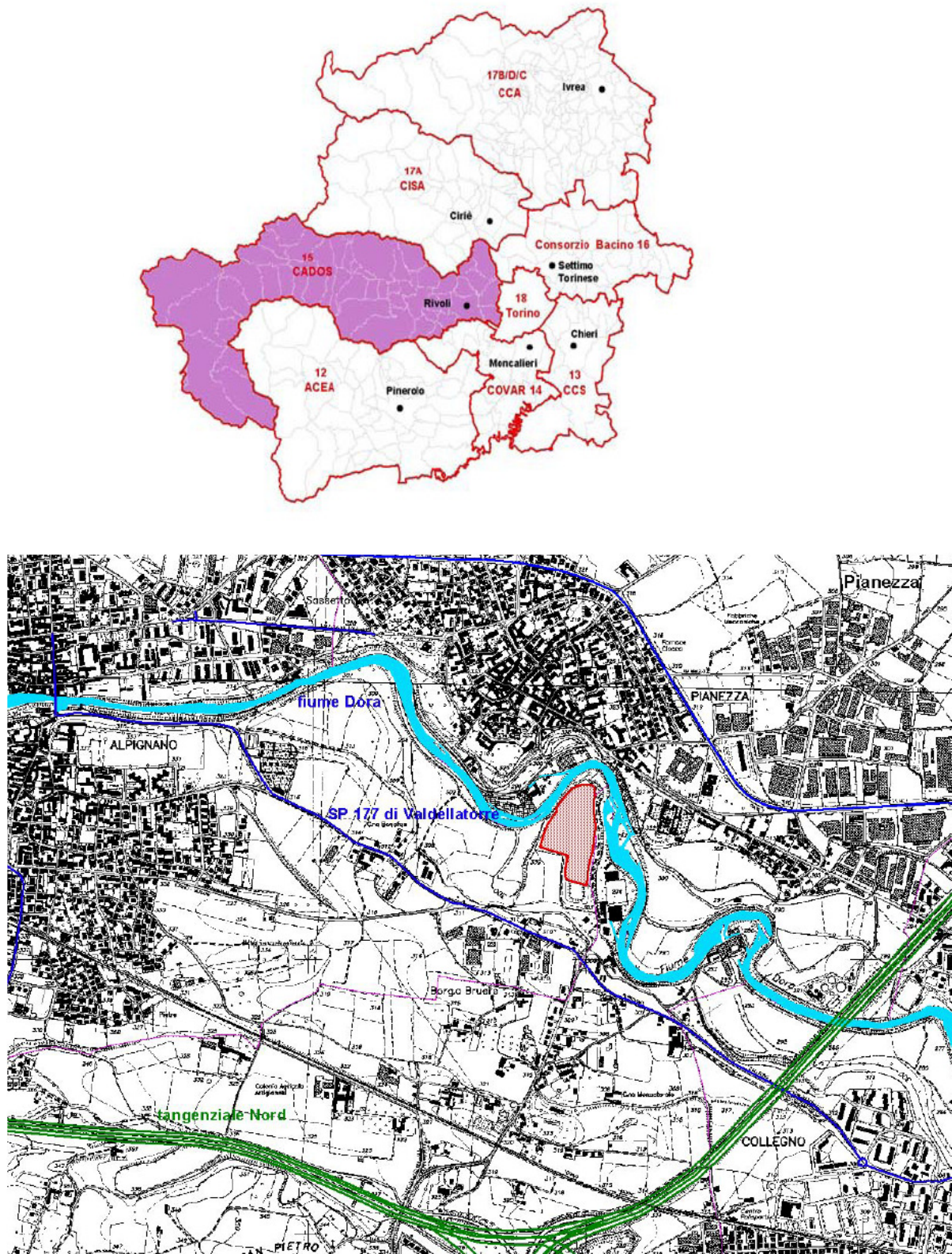


Figura 2. 8: Ubicazione della discarica di Alpiignano – Località Bruere

Problematiche ambientali

La parte centrale è priva di impermeabilizzazione artificiale, vi è unicamente la barriera geologica naturale costituita dal terreno argilloso sottostante; le parti nord e sud sono invece impermeabilizzate con telo in HDPE e sono provviste di sistema di drenaggio del percolato. Il progetto di recupero ambientale presentato dal CIDIU S.p.A. in dicembre 1997 prevedeva:

- la risagomatura della sommità della discarica e della scarpata est;
- ricopertura della trincea drenante;
- inerbimento della sommità e della scarpata rimodellata
- rimoboschimento naturaliforme della scarpata est ed in parte della nord;
- impianto sulla sommità della discarica di alberi ed arbusti con modalità paesaggistiche.

La discarica è interessata da fenomeni di migrazioni di gas nel sottosuolo esterno. A seguito della segnalazione del superamento delle soglie di rischio nel sistema di monitoraggio del biogas esterno alla discarica, oltre ai provvedimenti già proposti dal CIDIU, con nota prot. 13536/LA6 del 17/01/2005 la Provincia di Torino prescriveva:

- estrazione e combustione del biogas presso tutti i pozzi presenti nel corpo discarica e invio della relazione tecnica sullo stato di efficienza del sistema di estrazione e combustione del biogas;
- analisi con cadenza settimanale del biogas prelevato presso i punti di monitoraggio esterni alla discarica;
- analisi del biogas presso tutti i possibili bersagli di migrazione presenti nell'area circostante la discarica e segnalazione immediata alle autorità competenti qualora vengano rilevate condizioni di rischio.

Prescrizioni della Provincia di Torino

Il monitoraggio ambientale secondo quanto prescritto dalla Provincia di Torino con lettera prot. n. 204411 del 21/07/2004 prevede la misurazione, con cadenza settimanale, dei seguenti parametri: CH₄, CO₂, L.E.L, pressione del gas rispetto all'esterno, temperatura e pressione atmosferica. La tabella che segue sintetizza i controlli da effettuare secondo le suddette prescrizioni e la cadenza temporale.

2. Tecniche di bonifica e di messa in sicurezza di siti con presenza di biogas

discarica di Alpignano	parametri	n° p.ti prelievo	frequenza misurazione/ analisi	frequenza trasmissione dati
Monitoraggio biogas	CH ₄ (%), CO ₂ (%), O ₂ (%), L.E.L. (%), pressione del gas rispetto all'esterno (mmH ₂ O), temperatura atmosferica (°C), pressione atmosferica (mbar)	19	settimanale	quadrimestrale

Tabella 2. 6: Prescrizioni ambientali relative alla discarica di Alpignano

3 Caso studio

Il sito in esame, denominato “Fondo Colombarotto”, situato in località Piratello del Comune di Imola, presenta un’area di 49.000 m^2 , confinante a Nord-Est ed a Sud-Est con altri fondi di proprietà privata, a Sud-Ovest con la proprietà del fondo ed a Nord-Ovest con una strada locale (Via Piratello). Si riportano nelle Figure 3.1 e 3.2 le foto aeree del “Fondo Colombarotto” prima e dopo l’intervento. In rosso sono evidenziati i confini dell’area di ex-cava su cui l’intervento è stato realizzato.



**Figura 3. 1: Fondo Colombarotto durante l'intervento di ripristino ambientale
(Google Earth)**



Figura 3. 2: Fondo Colombarotto dopo l'intervento per la messa in sicurezza permanente e recupero agronomico (Fabbri , 2008)

Dalle fotografie si evince l'ubicazione del sito in zona agricola; l'intervento effettuato è finalizzato alla messa in sicurezza permanente ed al recupero agronomico dell'area stessa.

3.1 Descrizione del sito: caratterizzazione litostratigrafica e idrogeologica

Per quanto riguarda l'assetto geomorfologico generale, il sito "Fondo Colombarotto" si colloca in posizione centrale nell'ambito del semiconoide in destra del T. Sellustra, la cui superficie mostra una pendenza regolare pari a circa 0,5 % verso nord ed è elevata di circa una decina di metri rispetto all'alveo attuale, posto ad ovest. In particolare negli immediati dintorni del sito in esame, il primo sottosuolo è costituito da una successione alluvionale tabulare così caratterizzata, a partire dalla superficie (Marabini, 2007):

- Presenza di un **suolo vegetale limoso-argilloso** di colore bruno-rossastro, con uno spessore pluri-decimetrico dell'orizzonte di decarbonatazione, e

un sottostante orizzonte “calcico” ben espresso⁷. Si tratta, in sostanza, di un suolo evoluto genericamente riferibile alla tipologia regionale dei suoli “Tegagna”.

- Presenza di un “orizzonte subsuperficiale”, di spessore medio dell’ordine di una decina di metri, costituito da alternanza metrica di **strati limosi-argillosi** (in genere corrispondenti a suoli sepolti, cioè paleosuoli) e di **strati limosi-sabbiosi** (che documentano antichi episodi di esondazione fluviale). E’ all’interno di questa unità stratigrafica che furono passato estratti terreni per laterizi, e che quindi sono stati stoccati anche i fanghi di cartiera.
- Presenza di un “orizzonte profondo”, a profondità di oltre la decina di metri, costituito da alternanza di **strati prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi**, la cui geometria lenticolare è riconducibile ai principali tracciati di paleoalveo dell’antico Sellustra.

Questa fitta alternanza di strati limosi-argillosi, quindi impermeabili o poco permeabili, e di strati limosi-sabbiosi, più o meno permeabili, comporta implicazioni importanti per gli equilibri idrogeologici della zona, così riassumibili (Marabini, 2007):

- La presenza in superficie di un suolo vegetale limoso-argilloso determina , in generale, una scarsa capacità di infiltrazione naturale delle acque meteoriche in profondità, a differenza di quanto si è verificato, ovviamente, negli ultimi tempi all’interno del sito “fondo Colombarotto”;
- La disomogeneità stratigrafica dovuta all’alternanza metrica di strati limosi-argillosi e di strati limosi-sabbiosi determina, in generale, una difficoltosa filtrazione verticale delle acque subsuperficiali, la quali tendono piuttosto a ristagnare e filtrare con andamento sub orizzontale;
- La presenza di uno strato piuttosto continuo di terreni sabbiosi e ghiaiosi a partire da profondità di una decina di metri (cioè a quota paragonabile a quella dell’alveo del Sellustra) corrisponde al primo effettivo acquifero superficiale di questo ambito di pianura. Il livello della relativa falda

⁷ Per “decarbonatazione” di un suolo, si intende correntemente quel processo di ‘mobilitazione’ progressiva del suo contenuto in carbonato di calcio dagli orizzonti superiori a quelli più profondi, durante il suo periodo di esposizione in superficie, per effetto della percolazione delle acque piovane acide, quindi chimicamente aggressive.

freatica, in corrispondenza del sito “fondo Colombarotto”, in effetti, è documentato a profondità variabile tra -11/-14m.

3.1.1 Indagini geognostiche di approfondimento

All'interno del sito “fondo Colombarotto” sono state effettuate, a partire dall'inverno 2005-2006, decine di terebrazioni, in primo luogo per definire le caratteristiche di miscelazione dei fanghi, ma anche per la messa in opera di vari tipi di attrezzature di monitoraggio dei livelli idrici e delle emissioni gassose. Inoltre, dettagliate osservazioni stratigrafiche e litologiche di dettaglio sono state effettuate, anche recentemente, durante la realizzazione delle trincee per i biofiltri. I risultati stratigrafici e idrogeologici in tal modo acquisiti sono così riassumibili, in particolare per quanto riguarda specificatamente la stratigrafia del colmamento della precedente depressione estrattiva (Marabini, 2007):

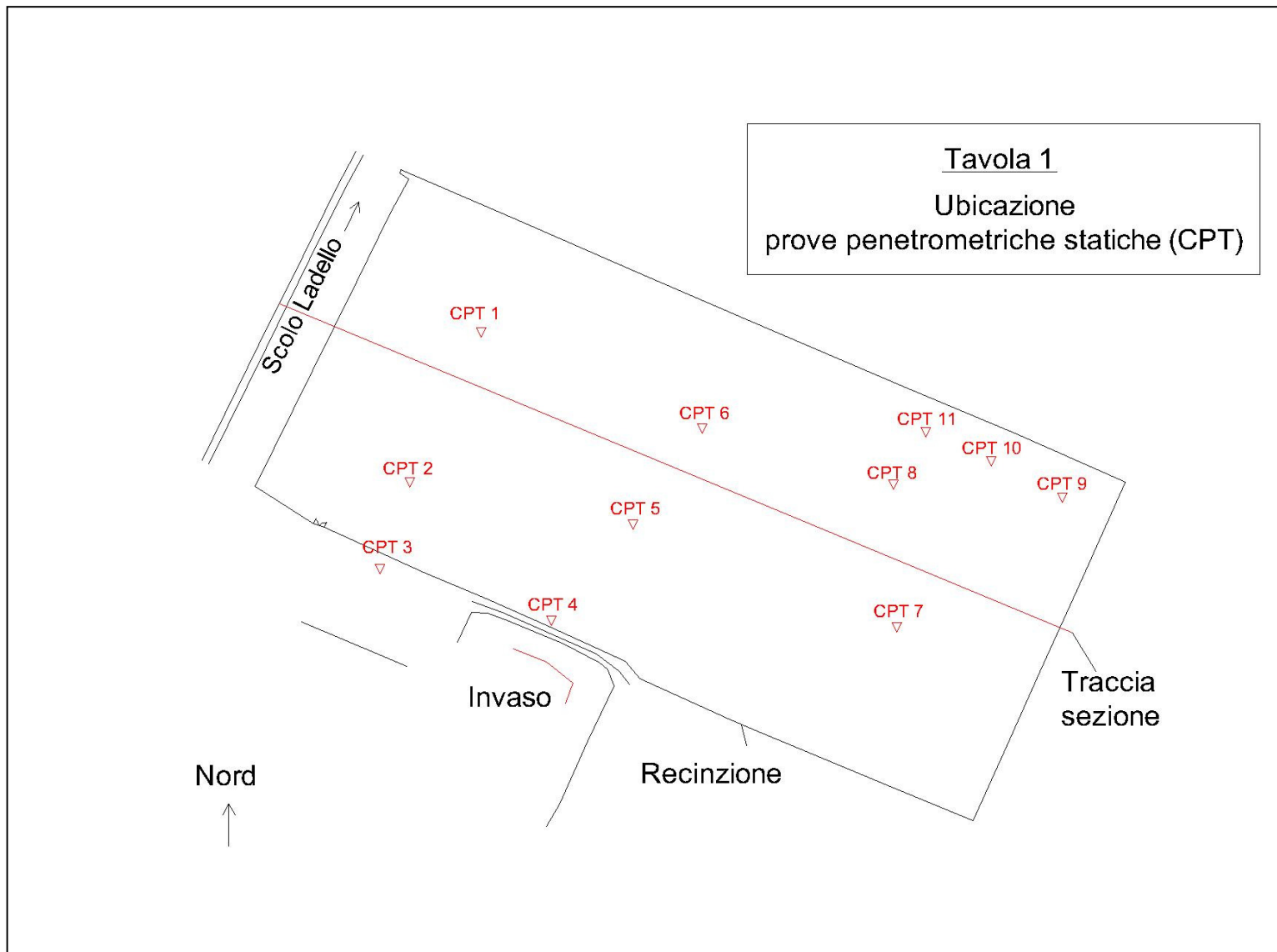
- lo spessore complessivo dei terreni rimaneggiati in fase estrattiva e di quelli connessi allo stoccaggio dei fanghi è discretamente variabile (lo spessore medio oscilla dai 6 ai 7 metri, con un massimo di 8 metri);
- la discontinuità verticale e orizzontale dei materiali di colmamento, caratterizzata in particolare anche dalla presenza saltuaria di strati decimetrici di terreni argillosi compattati, induce una notevole predisposizione per il ristagno delle acque meteoriche di infiltrazione, in maniera più articolata e, in un certo senso, più accentuata rispetto al contesto naturale circostante descritto in precedenza.

Allo scopo di verificare con maggiore puntualità e attendibilità quanto appena detto, a supporto sia della fase progettuale che esecutiva dell'intervento realizzato (di cui si parlerà nel capitolo 4), è stata effettuata una specifica **campagna di approfondimento geognostico**, che è consistita, in primo luogo, nell'esecuzione di **prove penetrometriche statiche di tipo meccanico**, cioè con utilizzo di punta di tipo olandese (*Delft mantle cone*) (siglate CPT). Le prove penetrometriche statiche CPT, come noto, consistono nell'infissione nel terreno, a velocità costante di circa 2 cm/sec, di apposite aste metalliche, di diametro pari a circa 2 cm, cui è collegata una centralina che misura, in funzione della profondità raggiunta, alcuni parametri della resistenza (espressa in kg/cm^2) che i terreni oppongono all'operazione, in sostanza la loro compattezza. Da questi parametri, che vengono

tabulati in grafici, si può stimare empiricamente la natura litologica dei terreni: le argille, ad esempio, mostrano in genere valori contenuti di resistenza all'infissione della punta penetrometrica e, al contrario, trattandosi di materiali coesivi, valori relativamente elevati di attrito laterale sulle aste; le sabbie, all'opposto, oppongono in genere maggiore resistenza all'infissione della punta e scarso attrito laterale. Si tratta, peraltro, di una tecnica di indagine geognostica indiretta, cioè senza prelievo di terreno, la cui interpretazione litostratigrafica necessita di una taratura sulla base delle stratigrafie geologiche dirette disponibili per l'immediato intorno (Marabini, 2007).

In particolare, sono state realizzate 11 CPT, distribuite in modo omogeneo all'interno dell'area lungo tracciati tali da favorire una correlazione dei dati stratigrafici già disponibili (CPT 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8), in un caso nell'immediato esterno in un contesto naturale (CPT 3), in altri per l'approfondimento di situazioni di dettaglio (CPT 9, 10 e 11); esse sono state spinte in generale sino a profondità di -15 metri, al fine di favorire la distinzione geometrica tra il colmamento e i terreni naturali incassanti. La loro ubicazione è riportata nella Figura 3.3 (Marabini, 2007).

Infine, i risultati penetrometrici sono stati verificati con un paio di altre terebrazioni, le quali hanno consentito di misurare, in maniera indicativa tramite **prove di tipo Lefranc a carico variabile**, il grado di permeabilità nei diversi punti (Marabini, 2007).



**Figura 3. 3: Ubicazione
prove penetrometriche
statiche, CPT (Marabini,
2007)**

3.1.2 La regimazione idrica subsuperficiale

Per quanto riguarda gli obiettivi progettuali connessi ai caratteri geologici del contesto in cui si colloca il sito “Fondo Colombarotto” si è ritenuto, sulla base degli approfondimenti geognostici effettuati, di individuare e perseguire le seguenti direzioni di intervento per conseguire una regimazione idonea sia delle acque superficiali che sub superficiali (Marabini, 2007):

- i primo luogo è stato necessario ricostituire un assetto del suolo superficiale che riconducesse la capacità di infiltrazione efficace delle acque meteoriche nel sottosuolo a condizioni paragonabili a quelle originarie (relativamente contenute), mediante un’adeguata “baulatura morfologica” e lo scavo di fossi di scolo:
- in secondo luogo, al fine di ottenere adeguate garanzie in merito alla efficienza di regimazione idrica subsuperficiale indotta indirettamente dalla sistemazione agraria di superficie, si è ritenuto opportuno anche eseguire ulteriori opere. In particolare, è stata ideata l’esecuzione di alcuni pozzi-serbatoio da perforarsi sino a circa – 8m, tali da non interferire con la sottostante falda freatica. La principale caratteristica di tali opere è quella di consentire, al tempo stesso, sia una funzione di monitoraggio che anche, in caso di necessità, interventi diretti di regimazione delle acque superficiali, in quanto possono sia evidenziare eventuali situazioni di eccesso di ristagno subsuperficiale all’interno del colmamento (in concomitanza di eventi eccezionali di precipitazione meteorica), sia eventualmente provvedere direttamente alla loro mitigazione, tramite emungimento con pompe delle acque raccolte.

3.2 Caratterizzazione dei fanghi

In questo paragrafo vengono affrontati gli argomenti che riguardano la caratterizzazione chimico-fisica e le analisi di stabilità dei fanghi utilizzati in sede di ripristino ambientale del sito in esame (“Fondo Colombarotto”).

Il fango di cartiera è caratterizzato da una grossa frazione di sostanza organica ed è notoriamente molto stabile rispetto ad una degradazione aerobica. Questo significa che la degradazione aerobica è molto lenta e spiega il suo uso nei recuperi ambientali. Al tempo stesso il fango di cartiera è facilmente degradabile per via anaerobica portando alla produzione di metano nel tempo. La degradazione anaerobica è stata favorita nel caso in esame dalla presenza di un cappellaccio argilloso e dall’assenza di inibenti (Dall’Ara, 2007).

3.2.1 Caratterizzazione chimico-fisica

Per le varie tipologie dei fanghi, sono disponibili sul web banche dati specializzate [<http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp>]. “PHYLLIS” riporta la composizione delle “biomasse e dei rifiuti” in generale e fornisce informazioni specifiche riguardo la composizione e le caratteristiche chimico-fisiche dei **fanghi di cartiera** (*paper sludge*). Di seguito sono riportate le caratterizzazioni chimico-fisiche per cinque tipologie di fango:

1. Fanghi di cartiera (*paper sludge*);
2. Fanghi dai residui di carta (*paper residue sludge*);
3. Fanghi dai residui di carta, granulati (*paper residue sludge, granulates*);
4. Fanghi da chiarificatore (*sludge, clarifier sludge*);
5. Fanghi di disinchiostrazione (*sludge, deinking sludge*).

Fanghi di cartiera

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	23,6	54,8
Acqua	56,9	-

Tabella 3. 1: Analisi immediate (% in peso)

As 1,2	Hg 0,7
Cd 0,5	Ni 13,4
Cr 19,5	Pb 72
Cu 120	Zn 798

Tabella 3. 2: Analisi dei metalli pesanti (mg/kg SS)

SO_3 0,2	Al_2O_3 23,7
SiO_2 35	CaO 37,5
Fe_2O_3 1,8	MgO 1,8

Tabella 3. 3: Composizione delle ceneri (% in peso delle ceneri)**Fanghi dai residui di carta**

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
Cenere	40,8	45,9	-
Acqua	11	-	-
Sostanze Volatili	43,3	48,7	90

Tabella 3. 4: Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Volatile
C	21	23,6	43,6
H	2,7	3,08	5,7
O	23,6	26,5	49
N	0,64	0,72	1,33
S	0,11	0,12	0,22
Cl	0,088	0,099	0,183
F	0,012	0,013	0,024

Tabella 3. 5: Composizione elementare (% in peso)

Fanghi dai residui di carta, granulati

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
Cenere	42,2	47,3	-
Acqua	10,7	-	-
Sostanze Volatili	40,5	45,4	86,1

Tabella 3. 6: Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	20,4	22,9	43,5
H	2,6	2,94	5,6
O	23	25,8	48,9
N	0,64	0,72	1,37
S	0,3	0,34	0,65
Cl	0,021	0,024	0,046
F	0,017	0,019	0,036

Tabella 3. 7: Analisi finali (% in peso)

Al 66.000	Cu 52	Na 380	Sn 6
As 0,7	Fe 2.920	Ni 7,4	Sr 120
B 26	Hg 0,1	P 1.520	Ti 1.300
Ba 55	K 3.610	Pb 16	V 13
Ca 95.800	Mg 2.460	Sb 0,6	Zn 62
Cd 0,6	Mn 76	Se 0,8	
Co 2,2	Mo 1,7	Si 63.800	

Tabella 3. 8: Analisi dei metalli (mg/kg SS)

Fanghi da chiarificatore

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	4,9	11,6
Acqua	58	-

Tabella 3. 9: Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	21,7	51,6	58,3
H	2,4	5,72	6,5
O	12,3	29,2	33,1
N	0,4	0,96	1,09
S	0,39	0,93	1,05

Tabella 3. 10: Analisi finali (% in peso)

Fanghi di disinchiostrazione

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	20,2	48,1
Acqua	58	-

Tabella 3. 11: Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	12,1	28,8	55,6
H	1,5	3,53	6,8
O	7,9	18,8	36,3
N	0,22	0,52	1
S	0,07	0,17	0,33

Tabella 3. 12: Analisi finali (% in peso)

Dalle tabelle si evince che il contenuto di carbonio per le diverse tipologie di fango riportate varia dal 12% al 22% sul tal quale, mentre il contenuto di ossigeno è compreso tra l'8% ed il 24% sul tal quale.

Si riporta inoltre in tabella 3.13 la caratterizzazione in cellulosa, emicellulosa e lignina di alcune tipologie di fanghi di cartiera, diverse da quelle riportate in precedenza. La cellulosa e l'emicellulosa vanno da un minimo del 9% ad un massimo del 45% sulla sostanza secca; la lignina varia dal 16% al 30% sul campione secco.

	Fango di disinquinazione della carta	Fango di cartiera primario	Fango di cartiera (<i>paper mill</i>)
Cellulosa	35,6	45	23,4
Emicellulosa	9,4	-	-
Lignina	20,5	30	16,1

Tabella 3. 13: Contenuto di cellulosa, emicellulosa e lignina (% in peso del campione secco) [<http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp>]

3.2.2 Caratterizzazione chimico-fisica dei fanghi del sito “Fondo Colombarotto”

Campioni di fango sono stati analizzati per la sostanza secca, la sostanza volatile (come perdita alla calcinazione), la conducibilità, pH, TKN, azoto nitrico ed ammoniacale, il carbonio organico ed il suo frazionamento in accordo con i metodi ufficiali di analisi dei suoli ed i metodi ufficiali dei fertilizzanti. Per le analisi per cui è richiesto il campione essiccato all'aria, si è proceduto in essiccazione in stufa ventilata ($T \leq 40^{\circ}\text{C}$) e successiva macinazione e setacciatura. Poiché parte del campione era rappresentato da fibre non macinabili, le analisi sono state eseguite su entrambe le componenti.

I risultati della caratterizzazione chimico-fisica sono riportati in tabella 3.14.

3. Caso studio

<i>Parametri chimico-fisici</i>	<i>Fango tal quale</i>
Sostanza Secca SS (Residuo a 105 °C)	41,5 %
pH	7,3
Conducibilità	0,52 dS/m
Sostanza Volatile (Perdita a 550 °C)	22,5 %
Carbonio Organico Totale (TOC)	8,88 %
Azoto Totale TKN	0,08 %
Azoto ammoniacale	0,01 %
Azoto nitrico	1,95 mg/kg
C/N	107

Tabella 3. 14: Parametri chimico-fisici sul tal quale (Dall'Ara *et al.*, 2007)

<i>Parametri chimico-fisici su SS</i>	<i>Sostanza secca</i>	<i>Setacciato (< 500 µm)</i>	<i>Non setacciato (>500 µm)⁸</i>
Sostanza Volatile (Perdita a 550 °C)	54,2 %	49,4 %	67,3 %
Carbonio Organico Totale (TOC)	21,4 %	19,5 %	26,6 %
Carbonio Organico Estraibile (TEC)		2,96 %	
Acidi umici e fulvici		1,92 %	

Tabella 3. 15: Parametri chimico-fisici sulla sostanza secca (Dall'Ara *et al.*, 2007)

I valori riscontrati sono coerenti con le caratterizzazioni dei fanghi di cartiera descritti in precedenza, per fanghi al termine di processi produttivi. Le concentrazioni di C e di N sul tal quale sono leggermente inferiori ai dati di letteratura riportati. L'umidità al 58,5% è congruente con le diverse tipologie di fanghi sopra descritte.

Dalle analisi chimico-fisiche si nota la presenza macroscopica di parti fibrose, indicativa di una matrice organica a stadio iniziale di degradazione, tenendo anche conto di un valore delle concentrazioni di carbonio e sostanza volatile più elevate nella parte fibrosa. Da sottolineare anche l'elevato valore di C/N, molto lontano dai valori ottimali 15-35 per la biostabilizzazione aerobica /compostaggio.

⁸ Pari al 27% del tal quale.

3.2.3 Analisi di stabilità

La sola caratterizzazione chimico-fisica dei fanghi non dà conto della possibile evoluzione e del comportamento degli stessi e quindi non è sufficiente a determinare le scelte di un intervento *in situ*. Si è ritenuto perciò di utilizzare anche metodi respirometrici di laboratorio per la determinazione sia della stabilità aerobica, mediante la misura dell'Indice Respirometrico Dinamico (IRD), che della stabilità anaerobica, mediante misura del Potenziale Biochimico di Metanazione (BMP).

L'indice respirometrico (IRD) è un parametro analitico fondamentale per la valutazione del processo di trattamento di biostabilizzazione aerobica delle biomasse, utilizzato e sviluppato nel settore dei *compost*. Il monitoraggio temporale della stabilità biologica (aerobica) del fango di cartiera, sottoposto a trattamento, permette di valutare il grado di decomposizione della sostanza organica fermentescibile in prodotti biologicamente stabili. Il test tende a riprodurre in laboratorio le condizioni che si verificano nella realtà del trattamento condotto sulle matrici organiche, permettendo quindi di gestire nel tempo la tipologia di intervento applicata *in situ*.

La metodologia per la determinazione del BMP invece è stata sviluppata come stima della biodegradabilità anaerobica per valutare la resa di metanizzazione di una matrice organica e quindi l'impiego per la produzione energetica.

Le due metodologie per il monitoraggio, della biodegradabilità in condizioni aerobiche ed anaerobiche, sono state applicate in parallelo per la caratterizzazione di campioni di fango di cartiera del sito "Colombarotto". La verifica della stabilità biologica aerobica, ovvero della limitata reattività biochimica del materiale, viene effettuata mediante la determinazione del parametro analitico di riferimento, l'Indice di Respirazione, determinato in condizioni di umidità standardizzata per tutti i campioni testati e definito Potenziale (IRD). Le prove per la determinazione dell'indice di respirazione dinamico (IRD), prevedono l'adozione del respirometro adiabatico (Respirometer 3022 Costech Instrument), specializzato per la linea biomasse in accordo al metodo dinamico DiProVe.

Per ciascuna tipologia di campione sono previste prove, almeno in duplicato con campioni rappresentativi di circa 10-15 kg di materiale tal quale.

L'Indice Respiriometrico, inteso come IRDP, è espresso in Norma Tecnica UNI, come consumo orario di ossigeno per unità di biomassa del campione $\left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$.

Di conseguenza, per una omogeneità dell'unità di misura, anche i valori di produzione specifica di metano sono espressi in funzione dei solidi volatili $\left(\frac{Nm^3_{CH_4}}{tSV} \right)$. Il test di biometanazione (BMP) fornisce la misura della quantità

massima di gas metano (espressa come CH_4/SV), producibile dalla sostanza organica, contenuta nella fase solida monitorata. La determinazione del Potenziale Biochimico di Metanazione (BMP) viene eseguita in accordo con i metodi riportati in letteratura (Owen *et al.*, 1979; Wolf-Rudiger *et al.*, 2004), testando una quantità nota di campione inoculata con fango anaerobico proveniente da un impianto di trattamento reflui agro-industriali, preventivamente acclimatato. Periodicamente sono misurate la quantità di biogas prodotto dal processo biologico e, mediante metodo cromatografico, la percentuale di metano rispetto al biogas prodotto. Il periodo di incubazione prevede una durata di 100 giorni e comunque superiore a 30 giorni.

3.2.4 Stabilità aerobica ed anaerobica dei fanghi del sito “Fondo Colombarotto”

Sono di seguito riportati gli andamenti di alcuni test respirometrici, registrati durante le prove per la misura della stabilità biologica e del potenziale di biometanazione effettuati su due campioni di fango di cartiera rappresentativi, prelevati in punti distinti dell'area oggetto di studio. Nella figura 3.4 sono riportati gli andamenti, registrati durante i test, dell'IRDP e della temperatura della biomassa, quest'ultima come parametro indicatore della qualità del test e dei risultati ottenuti.

3. Caso studio

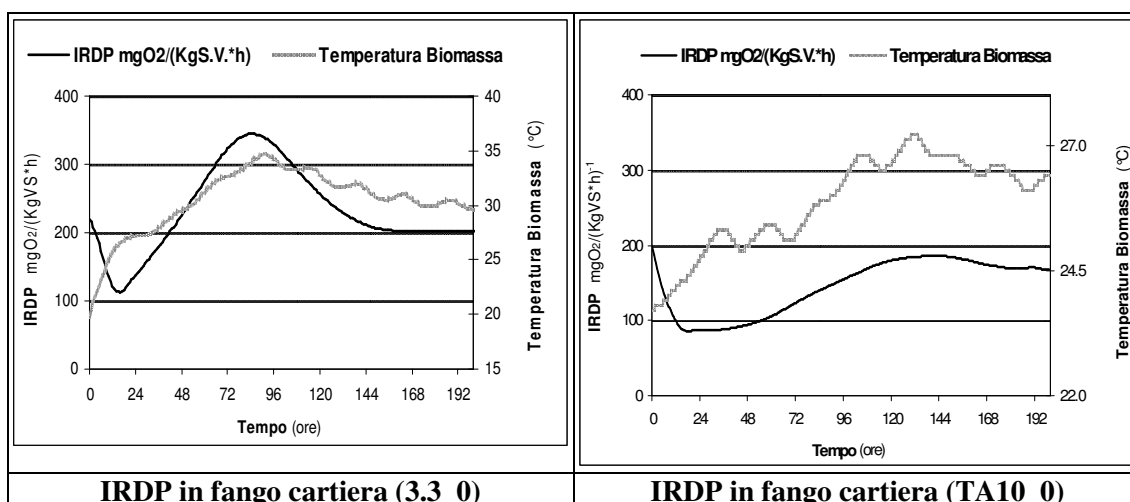


Figura 3. 4: IRDP in fango di cartiera

In fig. 3.5 sono riportati gli andamenti della produzione metanigena registrati durante l'esecuzione di BMP test in condizioni discontinue (*batch*).

In tabella 3.16 sono riportati i valori medi dei risultati dei test respirometrici ed il valore della composizione percentuale di metano presente nel biogas prodotto dai campioni (% CH₄ v/v). La produzione potenziale di metano si attesta tra 178 e $183 \left(\frac{Nm^3_{CH_4}}{t\ SV} \right)$. La percentuale di metano nel biogas prodotto varia dal 55 al 57%

(v/v_{biogas}) del biogas prodotto; tale percentuale può anche dare indicazioni della composizione elementare del fango stesso e della sua evoluzione nel tempo. Ad esempio una composizione elementare del tipo C₆H₁₀O₄, porta alla produzione di biogas composto per il 54% di metano e 46% di diossido di carbonio.

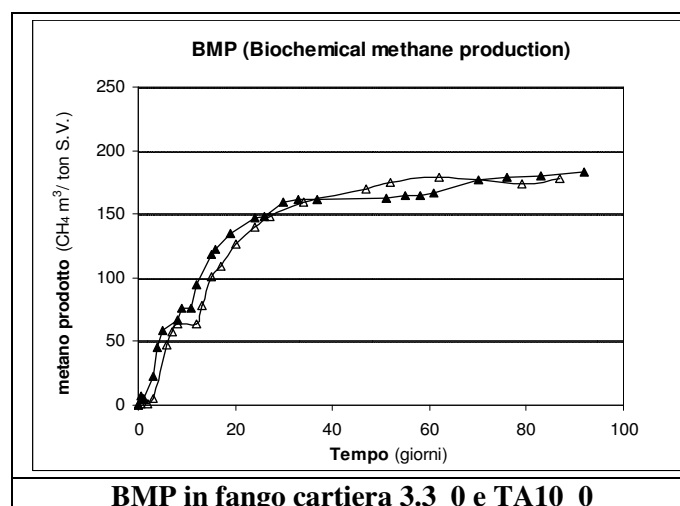


Figura 3. 5: BMP in fango di cartiera

Fango di cartiera (campionamenti)	IRD $\left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$	Produzione di metano (condizioni di misura 20°C)		
		$\frac{m^3}{t\ SS}$	$\frac{m^3}{t\ SV}$	(% CH ₄ v/v)
3.3._0	344.6	54.7	183.0	55.1
TA10_0	186.0	78.7	178.0	56.7

Tabella 3. 16: Valori medi dei risultati dei test respirometrici (Dall'Ara *et al.*, 2007)

I fanghi di cartiera hanno evidenziato un materiale caratterizzato da un'elevata stabilità $IRD < 500 \left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$ in condizioni aerobiche, come si evince dai dati relativi all'IRD inferiori a $350 \left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$, con valori variabili tra punti di campionamento rappresentativi. Diversamente i risultati del potenziale di biometanazione $183-178 \left(\frac{Nm^3_{CH_4}}{t\ SV} \right)$, caratterizzano lo stesso materiale come potenzialmente reattivo in condizioni anaerobiche, con valori ripetibili tra gli stessi campioni. Inoltre, come evidenziato dalle analisi chimico-fisiche, il valore di C/N superiore a 40 porta ad un rallentamento del processo di degradazione aerobica per carenza di azoto fino all'arresto dell'attività dei microrganismi. Diversamente, in condizioni anaerobiche ed in carenza di azoto, l'ammoniaca è prodotta in quantità insufficiente ad inibire il processo (Dall'Ara *et al.*, 2007).

4 Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

In questo capitolo verranno mostrate le diverse tappe con cui sono stati eseguiti l'intervento di messa in sicurezza ed il recupero agronomico, e la cronologia relativa alla realizzazione dell'intervento di monitoraggio in corso d'opera.

4.1 Cronistoria del “Fondo Colombarotto”

➤ Anni ottanta

Il sito in esame, denominato “Fondo Colombarotto” e situato in località Piratello del Comune di Imola, è stato oggetto di **attività estrattiva di materiale argilloso** negli anni ottanta.

➤ Giugno 2003/Dicembre 2004

L'area in esame è stata interessata da un **ripristino ambientale**⁹ effettuato ai sensi del Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998 per una superficie di 49.000 m², **che aveva previsto l'utilizzo di fanghi provenienti da industria cartaria** per 60.000 tonnellate. L'intervento di ripristino è stato effettuato negli anni 2003 e 2004 (precisamente dal 13.06.2003 al 13.12.2004 come riportato nel contratto tra il gestore del ripristino ed il proprietario del terreno). I fanghi per cui è stato richiesto lo stoccaggio nell'area di ex-cava rientrano nella categoria di “rifiuti speciali non pericolosi” dell'industria cartaria, ai sensi del Decreto Ronchi (D.Lgs. 22/97) ed in particolare sono classificati dai seguenti codici C.E.R. (Modarelli, 2008):

⁹ Nella documentazione relativa all'attività svolta sull'area in questione viene utilizzata la terminologia “ripristino ambientale”, anche se ai sensi del D.M. 5.02.98 la definizione corretta sarebbe “recupero ambientale”.

- 03.03.02 Fanghi di recupero da bagni di macerazione;
- 03.03.05 Fanghi prodotti dai processi di disinchiostrazione nel riciclaggio della carta;
- 03.03.09 Fanghi di scarto contenenti carbonato di calcio;
- 03.03.10 Scarti di fibre e fanghi contenenti fibre, riempitivi e prodotti i rivestimento generati da processi di separazione meccanica;
- 03.03.11 Fanghi prodotti da trattamento in loco degli effluenti (diversi da 03.03.10);
- 03.03.99 Rifiuti non specificati altrimenti.

➤ **Dicembre 2005**

Nel Dicembre 2005 si sono verificate a distanza di una settimana due **deflagrazioni all'interno di un'abitazione di campagna distante circa 200 m dall'area di ex-cava** (Marroni *et al.*, 2006) per una fuga di gas; in particolare nell'abitazione si è verificato il crollo di una parte di una parete interna di laterizio per l'esplosione della sacca di gas accumulatosi nella retrostante intercapedine.

➤ **Gennaio 2006**

Sono stati effettuati **accertamenti per determinare l'origine del metano che ha indotto le esplosioni**; le verifiche svolte sotto il controllo di ARPA hanno confermato che l'origine delle deflagrazioni era nella produzione e migrazione di biogas dal vicino "Fondo Colombarotto" (Bonoli, 2006).

Infatti analisi specialistiche sulla rete domestica del gas hanno permesso di escludere che la responsabilità fosse di fughe del metano distribuito dalla rete urbana.

➤ **Gennaio 2006/Giugno 2006**

È stato approvato, con costi a carico della ditta C.A.R., autrice del ripristino, l'intervento di risanamento; in particolare si è intervenuti in due tempi: con la **messa in sicurezza di emergenza** (nel frattempo il sito era sottoposto a sequestro da parte della Procura della Repubblica) e con la **pianificazione della messa in sicurezza permanente**.

➤ **Giugno 2006/Agosto 2009**

Sono stati realizzati gli interventi di **messa in sicurezza permanente** e di **monitoraggio in corso d'opera**.

➤ **Aprile 2009**

In questa data è avvenuta la **riconsegna per uso agricolo del sito**.

4.2 Interventi di messa in sicurezza effettuati

➤ **Dicembre 2005/Gennaio 2006**

Dopo che nel dicembre 2005 nelle vicinanze del “Fondo Colombarotto” si sono verificate a distanza di una settimana due deflagrazioni all'interno dell'area di un'abitazione di campagna nel Comune di Imola, **l'Amministrazione Comunale ha emesso ordinanza di sgombero nei confronti dei residenti ed ha attivato ARPA Emilia Romagna**. Esclusa da parte dei Vigili del Fuoco ogni possibile origine da perdite della rete gas metano, la Sezione Provinciale ARPA di Bologna – Distretto Territoriale di Imola, di seguito denominata ARPA, ha ipotizzato e poi confermato che la sorgente della produzione di gas metano (biogas), responsabile delle deflagrazioni, era nella vicina area oggetto di ripristino ambientale.

- Il Comune di Imola, con ordinanza contingibile ed urgente, ha ordinato ai responsabili dell'intervento di ripristino di effettuare, sotto il controllo dell'ARPA, le opportune **verifiche tecniche**. Con una serie di sondaggi tradizionali, sia nell'area di ripristino che nell'intorno, con l'installazione di sonde per la ricerca di biogas e con campioni su carotaggi, si è appurato che:

- i fanghi conferiti appartenevano alle tipologie autorizzate;
- in diversi punti i fanghi non erano stati miscelati con il terreno secondo le percentuali volumetriche stabilite dalla norma di riferimento;
- la profondità di tombamento era eterogenea, anche di molto superiore a quella dichiarata ed autorizzata, ed arrivava fino a circa -9 m dal p.c.

Sono state misurate elevate concentrazioni di gas metano non solo all'interno dell'area di ripristino ma anche a circa 100 metri di distanza verso diversi bersagli sensibili (abitazioni). L'erronea modalità del tombamento dei fanghi ha contribuito in maniera rilevante ad indurre un accelerato processo di degradazione anaerobica della sostanza organica

contenuta (prevalentemente cellulosa), determinando la produzione di un'ingente quantità di biogas caratterizzato da elevate concentrazioni di metano (Marroni *et al.*, 2006).

- Tutte le successive fasi operative sono state preliminarmente esaminate nelle **Conferenze di servizio** convocate dall'Amministrazione Comunale, dove oltre all'ARPA erano state invitate anche la Provincia di Bologna e l'Azienda AUSL di Imola – Dipartimento di Sanità Pubblica.

- **Gennaio 2006/Giugno 2006**

Si è intervenuti in due tempi: con la messa in sicurezza di emergenza (nel frattempo il sito era sottoposto a sequestro da parte della Procura della Repubblica) e con la pianificazione della messa in sicurezza permanente.

Poiché lo scavo ed il conferimento in discarica di 60.000 tonnellate di fanghi, a cui vanno aggiunte paragonabili quantità di terreno miscelato, risultavano estremamente difficoltosi in primo luogo in termini di tempi e di costi (che sarebbero stati ingenti, visti i quantitativi da smaltire, ed avrebbero causato il fallimento della ditta C.A.R.) ed in secondo luogo in termini ambientali sanitari di grande impatto per la zona (maleodori, emissioni, rumori, traffico dovuti allo scavo ed al trasporto del materiale), si è cercato, in costante relazione con la Procura della Repubblica, di garantire una rapida messa in sicurezza e di studiare la fattibilità di un risanamento almeno parziale *in situ*.

- **Gennaio 2006: messa in sicurezza di emergenza.**

Il Comune di Imola, in accordo con gli altri Enti, ha pertanto ordinato alla Ditta C.A.R. di provvedere alla messa in sicurezza del sito mediante l'escavazione di una trincea perimetrale, la realizzazione un impianto di aspirazione di biogas (*Soil Vapour Extraction* - SVE) e di presentare un progetto di risoluzione permanente delle problematiche verificatesi all'interno dell'ex-cava (Marroni *et al.*, 2006).

Per la messa in sicurezza di emergenza dell'area dell'ex-cava è stata realizzata una trincea perimetrale profonda 7 metri per interrompere od almeno contenere la migrazione di gas verso i bersagli sensibili, ovvero le abitazioni limitrofe (Bonoli, 2006). All'interno della trincea è stato posizionato un materiale geotessile (geogriglia tridimensionale, tipo "Tenax Tenderai"), come mostrato in Figura 4.1.; la porosità della

geogriglia consente di far defluire verticalmente in atmosfera il biogas che migra orizzontalmente nei sedimenti verso l'esterno dell'area.

La messa in opera della trincea perimetrale¹⁰ con geotessile è stata, in pratica, una messa in sicurezza permanente dell'area esterna.

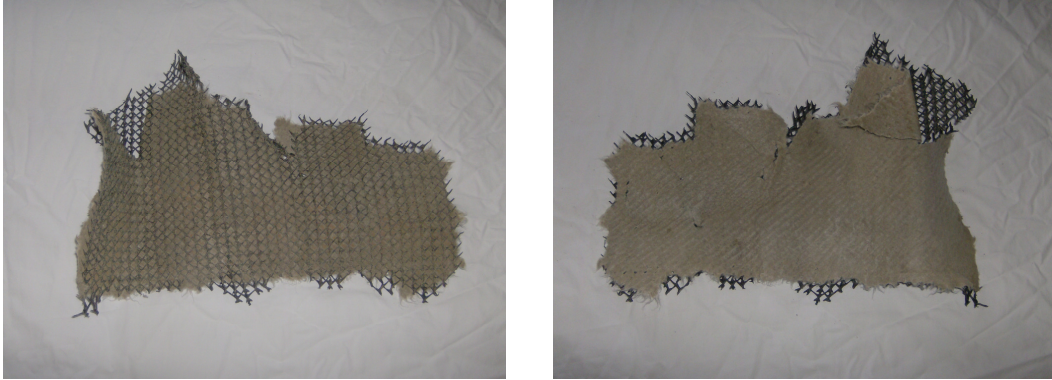


Figura 4. 1: Esempi del geotessile utilizzato (Modarelli, 2008)

Per la messa in sicurezza d'emergenza dei bersagli sensibili, è stata inoltre realizzata una barriera di pozzi di aspirazione del biogas (*Soil Vapour Extraction* – SVE), nei sedimenti in prossimità ed a difesa degli edifici circostanti. La messa in sicurezza è stata realizzata sull'intero spessore dei sedimenti insaturi ed ha consentito un rapido abbattimento dei tenori dei gas presenti (metano, anidride carbonica, ecc.) in prossimità delle abitazioni, a valle della rete di SVE come dimostrato dalle misure effettuate (Marroni *et al.*, 2006).

¹⁰ Congiuntamente al sistema di SVE.

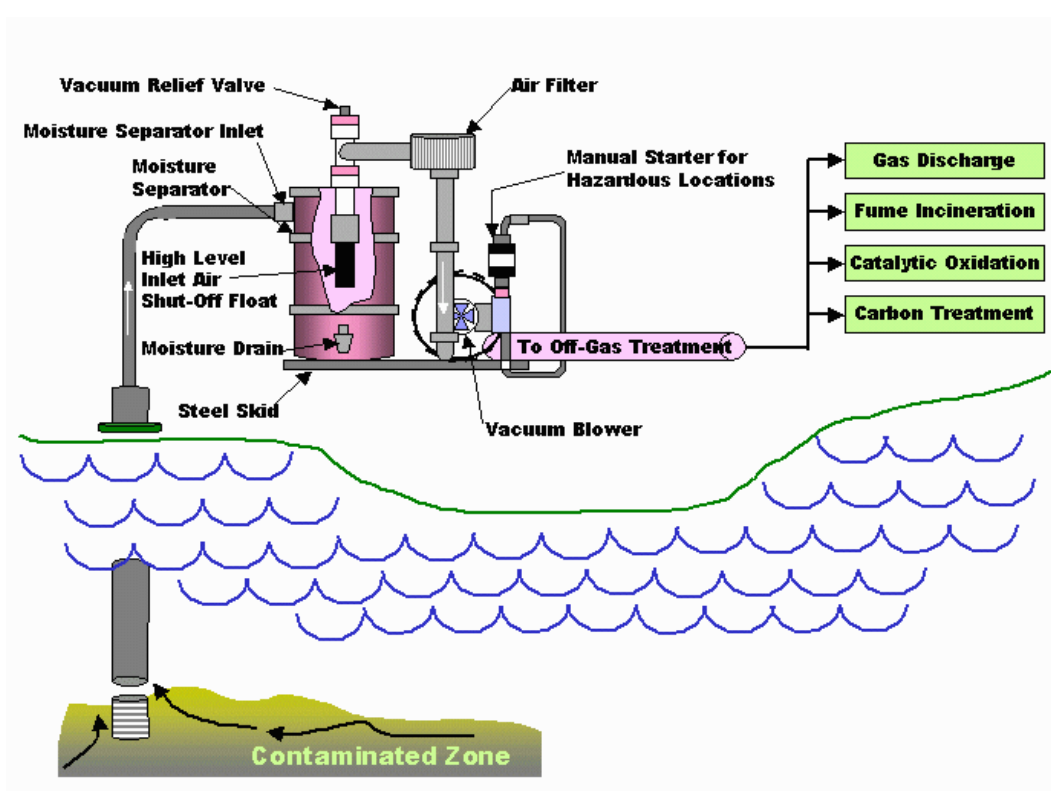


Figura 4.2: Soil Vapour Extraction (SVE)

[<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-7.gif>]

- **Giugno 2006: messa in sicurezza permanente.**

Per la messa in sicurezza permanente del sito e la rinaturalizzazione dello stesso è stato invece avviato un intervento di tipo fisico-meccanico e biologico all'interno dell'area, finalizzato anche al recupero ai fini agronomici dell'area di ex cava.

È stato escluso l'allontanamento dei fanghi, poiché lo scavo ed il conferimento in discarica di 60.000 tonnellate, a cui vanno aggiunte paragonabili quantità di terreno miscelato, risultava estremamente difficoltoso, in primo luogo in termini di tempi e di costi (non recuperabili dall'Amministrazione Pubblica) ed in secondo luogo in termini ambientali sanitari di grande impatto per la zona (maleodori, emissioni, rumori, traffico dovuti allo scavo ed al trasporto del materiale) (Bonoli, 2006). Si è scelto di garantire una rapida messa in sicurezza, mediante l'installazione di ulteriori punti di aspirazione

(SVE) collocati sul perimetro dell'area, e di studiare la fattibilità di un risanamento almeno parziale *in situ*.

L'intervento persegue i seguenti obiettivi (Dall'Ara, 2007):

- riduzione della formazione di metano, riducendo la potenzialità della produzione di metano dal fango;
- riduzione della presenza di metano, con allontanamento del gas già formato;
- recupero del sito per uso agronomico.

La risoluzione infatti consiste nel:

- ridurre la produzione di biogas a partire dalla degradazione della fase solida,
- regimare l'emissione di quello presente previa biofiltrazione e bioconversione e quindi eliminare la pericolosità residua dell'area,
- raggiungere il recupero a fini agricoli dell'area stessa.

4.2.1 Tipologia di intervento di biostabilizzazione e recupero dell'area

Non sono noti identici inconvenienti ambientali, quindi non c'è ancora una metodologia di risanamento di riferimento. Le condizioni locali sono diverse dalle bonifiche "convenzionali", sia perché il metano non è incluso tra i contaminanti, sia perché non si può esprimere l'efficacia del trattamento semplicemente come percentuale di riduzione rispetto alle condizioni iniziali. Infatti, col procedere del tempo, il metano si forma per via della degradazione anaerobica e la concentrazione presente è il risultato della differenza tra il metano prodotto e quello allontanato istante per istante (Dall'Ara, 2007).

La tecnologia proposta richiede l'intervento umano nella fase di preparazione e non richiede l'uso né di energia elettrica né di acqua. Tutto questo la rende una tecnologia sostenibile e rispondente a quanto stabilito nell'Allegato 3 alla parte sesta del D.Lgs. n°152 del 3 Aprile 2006 ("Norme in materia ambientale"), in merito alla riparazione di danni al terreno (Modarelli, 2008).

L'intervento effettuato appartiene alle **Tecniche di Bonifica *in situ***, ed in particolare è collocato all'interno delle **Tecniche Combinate**, poiché si configura come **trattamento fisico-meccanico e trattamento biologico**:

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

- si tratta di un trattamento biologico in quanto prevede esclusivamente l'uso di:
 - **compost “tailored”**,
 - **miscele enzimatiche di origine vegetale**,entrambi prodotti secondo una metodologia in fase di brevettazione;
- si tratta di un trattamento fisico-meccanico in quanto l'uso di compost a densità minore e a maggiore porosità crea una discontinuità all'interno del volume da decontaminare ed una conseguente via preferenziale per il flusso del biogas.

Si ricorda che la biorimediazione *in situ* (*in situ bioremediation*), consiste nell'uso di microrganismi indigeni, eterotrofi, aerobici ed anaerobici (Boopathy, 2000), per degradare contaminanti con lo scopo finale di ottenere prodotti chimici innocui [http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm]. Il trattamento biologico realizzato, basato sull'attenuazione naturale, contiene elementi propri della *biostimulation* e della *bioremediation*. Infatti, nella *biostimulation*, vengono introdotti nel suolo nutrienti sottoforma di fertilizzanti organici (compost), che aumentano la popolazione microbica indigena, mentre nel caso in esame vengono usate anche delle sostanze attivanti come nella *bioremediation*, per coadiuvare ed accelerare la degradazione dei contaminati ambientali ad uno stato d'inerzia, svolta comunque dai microrganismi già presenti nel suolo, in particolare dai microrganismi microaerofili. L'inserimento nel filone del trattamento biologico avviene anche per la particolare tipologia di compost utilizzato: si tratta infatti di un compost “tailored” progettato, prodotto per il trattamento di contaminanti specifici in siti specifici, in questo caso arricchito di microrganismi che degradano la cellulosa. In questo modo si affiancano le proprietà di un qualsiasi compost di qualità ad elevato grado di maturazione (che presenta una biomassa attiva dotata di elevata attività metabolica di tipo degradativo), con le caratteristiche specifiche per la risoluzione del problema in esame. La “**Compost Bioremediation**” è una procedura già validata dall'EPA (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente Americana) in diversi contesti, quali siti contaminati da idrocarburi, solventi, pesticidi, metalli pesanti, prodotti petrolifici ed esplosivi .

L'adozione di un compost “tailored” determina anche un effetto positivo sulle condizioni generali di formazione del suolo contribuendo, in particolare, al ripristino in tempi relativamente brevi di una qualità di terreno vegetale

paragonabile a quello originale preesistente: si tratta infatti di un materiale stabile ad elevato contenuto di sostanza organica, con la qualifica di ammendante e substrato.

4.2.2 Attuazione dell'intervento di stabilizzazione e recupero dell'area

➤ Giugno 2006

È stato realizzato direttamente *in situ* un **primo intervento in scala pilota** il 26 Giugno 2006, rappresentante una sorta di test di fattibilità per l'intervento sperimentale e che ha interessato un'area di circa 130 m², rispetto ad un'area complessiva di 49.000 m².

La tecnica fisico-biologica proposta è stata sviluppata secondo tre tipologie di intervento:

- **Trincee “Biofiltro”**, che fungono da camino convettore per la fuoriuscita del gas ed al tempo stesso consentono la trasformazione biochimica del metano in diossido di carbonio¹¹, favorita e catalizzata dai materiali utilizzati. Nello scavo è stato introdotto fino al piano campagna compost “*tailored*” e miscele enzimatiche selezionate. Dato il minor peso specifico del *compost* rispetto ai materiali costituenti il cappellaccio, si determina, attraverso la sostituzione del materiale tombato e dello strato superficiale con esso, una minore pressione litostatica e quindi si scongiura la formazione di sacche di gas e si favorisce la degasazione di quelle esistenti.
- **Trincee “Biopile”**, nel cui scavo è stato introdotto uno strato di compost “*tailored*”, le miscele enzimatiche ed il fango estratto durante lo scavo stesso, ricoperto con circa 1 m del cappellaccio originario. In questo modo si diminuisce la pressione litostatica agente sul materiale tombato e si favorisce quindi il degasamento, ma anche, data la maggiore porosità del compost rispetto al cappellaccio di copertura, l'instaurarsi di condizioni di microaerofilia, vantaggiose per il processo di biostabilizzazione aerobica. L'obiettivo di questo tipo di trincee è l'attivazione di fermentazioni non

¹¹ Non contabilizzata per il protocollo di Kyoto.

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

metanigene, cioè ridurre la produzione di metano dei fanghi, accelerando la loro degradazione aerobica.

- **Biopile esterno**, il fango estratto è stato miscelato con compost “*tailored*” in una proporzione opportunamente definita sulla base delle caratteristiche chimiche del materiale tombato, addittivato con le miscele enzimatiche e sottoposto ad un processo di compostaggio, in cumulo non rivoltato. Al termine del processo di biostabilizzazione e maturazione, il materiale così ottenuto è stato utilizzato *in situ* per il recupero agricolo dell'area.

➤ **Settembre 2006**

Nel Settembre 2006, in virtù dei risultati positivi riscontrati ed in previsione dell'inagibilità dell'area nel periodo invernale è stato deciso, concordemente con ARPA E.R. e Comune di Imola, di **estendere l'intervento sperimentale al 70% dell'area, al fine di ottenere risultati su scala più ampia e per contribuire alla rapida messa in sicurezza del sito**. Sono state realizzate 41 trincee delle tipologie sopra dette, trincee di dimensioni maggiorate rispetto all'intervento pilota, per tenere conto delle profondità dei focolai individuati. La profondità media è di 5-5,5 metri dal piano campagna, l'area superficiale di ciascuna è di circa 15 m².

Tutte le tipologie di trincee adottate hanno risposto positivamente, evidenziando funzioni diverse ed integrabili tra loro; perciò sono state tutte utilizzate nell'intervento sperimentale complessivo.

Visti i risultati di contenimento del metano ottenuti è stato presentato il progetto di risanamento dell'intera area interna alla trincea perimetrale con geotessile. La tecnica innovativa utilizzata è stata integrata con interventi di regimazione idraulica in superficie e di riequilibrio idrogeologico sotterraneo, per regimare il deflusso idrico sub-superficiale.

Il **biorecupero** ha il “**limite**” della **difficile previsione** dei **tempi necessari** per il completamento dell'intervento, che comunque è notoriamente tra il medio ed il lungo termine (Dall'Ara, 2007).

➤ **Ottobre 2006/Novembre 2007**

Realizzazione del progetto di risanamento dell'intera area.

➤ **Maggio 2007**

L'intervento fisico-biologico è stato completato su tutta l'area interna al fondo nel Maggio 2007, dopo l'approvazione del progetto da parte della Conferenza dei Servizi a seguito del dissequestro dell'area.

➤ **Ottobre 2007/Novembre 2007**

Per il completamento dell'intervento interno all'area sono state realizzate nell'Ottobre-Novembre 2007 la regimazione superficiale e la copertura vegetale. In particolare gli interventi effettuati sono stati:

- **Regimazione superficiale**, per ridurre al massimo l'infiltrazione in profondità delle acque meteoriche, tramite una sagomatura morfologica superficiale opportuna ed una rete di fossi con fondo impermeabilizzato, atte ad un idoneo allontanamento delle acque meteoriche inibendone al massimo l'infiltrazione delle stesse nel terreno.
- **Studio della condizione idrogeologica subsuperficiale**, per mitigare la presenza di condizioni anaerobiche all'interno del volume dei fanghi, per valutare l'opportunità di captazione omogenea delle acque di ristagno e di filtrazione subsuperficiale e loro stoccaggio temporaneo, per un utilizzo razionale di uso irriguo all'interno dell'area.
- **Realizzazione di copertura vegetale idonea** (ad es. manto erboso su tutta l'area), finalizzata a migliorare la praticabilità della stessa, a favorire la sofficià/respirazione del cappellaccio.
- **Realizzazione di nuovi pozzi per il monitoraggio dei gas** all'esterno delle trincee.

Un ruolo importante è rivestito dall'acqua: infatti per le caratteristiche morfologiche del terreno si creano dei bacini di raccolta dell'acqua piovana a varie profondità ("falde confinate") che occupa gli spazi del gas, comprimendolo, concentrandolo e convogliandolo. In queste condizioni si potenzia il flusso verso i biofiltri, vie di minor resistenza. **Gli interventi di regimazione superficiale ed idrogeologica subsuperficiale sono stati realizzati evitando interferenza con la falda freatica.**

Per cui gli interventi di regimazione superficiale, di piantumazione e di copertura vegetale sono finalizzate a ridurre le quantità di acqua raccolte all'interno dell'area.



Figura 4.3: Modello 3D dell'area in esame al termine dell'intervento di messa in sicurezza permanente (schematizzazione) (Modarelli e Virgallito, 2008)

➤ **Dicembre 2007/Dicembre 2009**

Sono tutt'ora previsti:

- **interventi di manutenzione ordinaria** (per esempio, il livellamento del compost nelle trincee),
- **interventi di manutenzione straordinaria.**

➤ **Dicembre 2009/Dicembre 2010**

Sono previsti poi **12 mesi** (eventualmente prorogabili) **di monitoraggio post-risoluzione dell'inconveniente** per verificare la irreversibilità della biostabilizzazione dei fanghi

A completamento di quanto esposto nei paragrafi 4.1 e 4.2, si riporta in figura 4.4 uno schema temporale delle principali attività che hanno caratterizzato la storia del “Fondo Colombarotto”, a partire dalla fase di ripristino ambientale, nel giugno del 2003, fino ad arrivare alla risoluzione dell'inconveniente prevista non prima della fine del 2009.

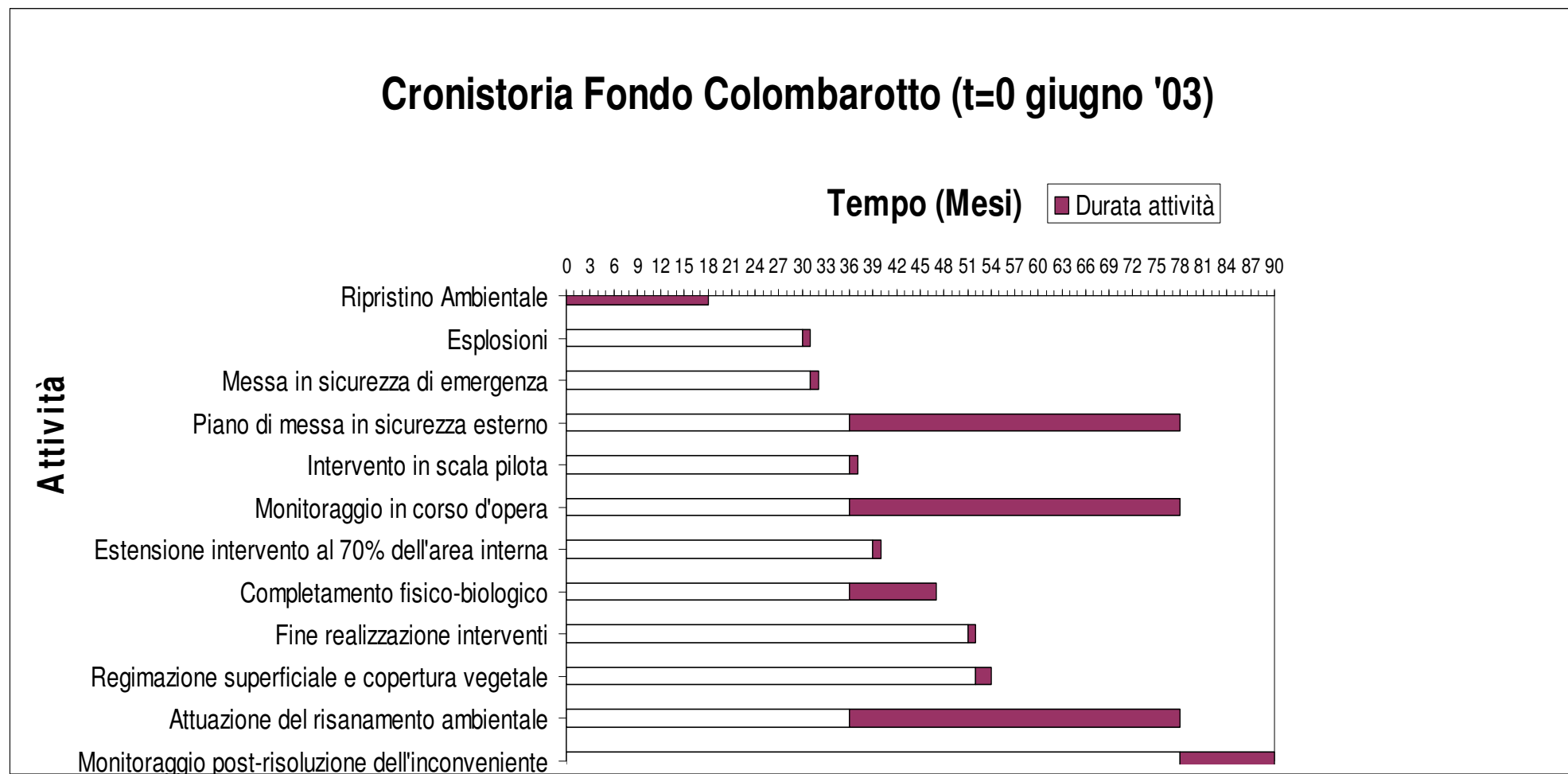


Figura 4.4: Cronistoria del “Fondo Colombarotto” (t=0 coincide con giugno 2003 – inizio del ripristino ambientale)

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

Infine, si riportano nelle figure 4.5-4.9 alcune fotografie dell'area dopo il completamento degli interventi.



Figura 4.5: Vista aerea di una porzione di area (Fabbri, 2008)

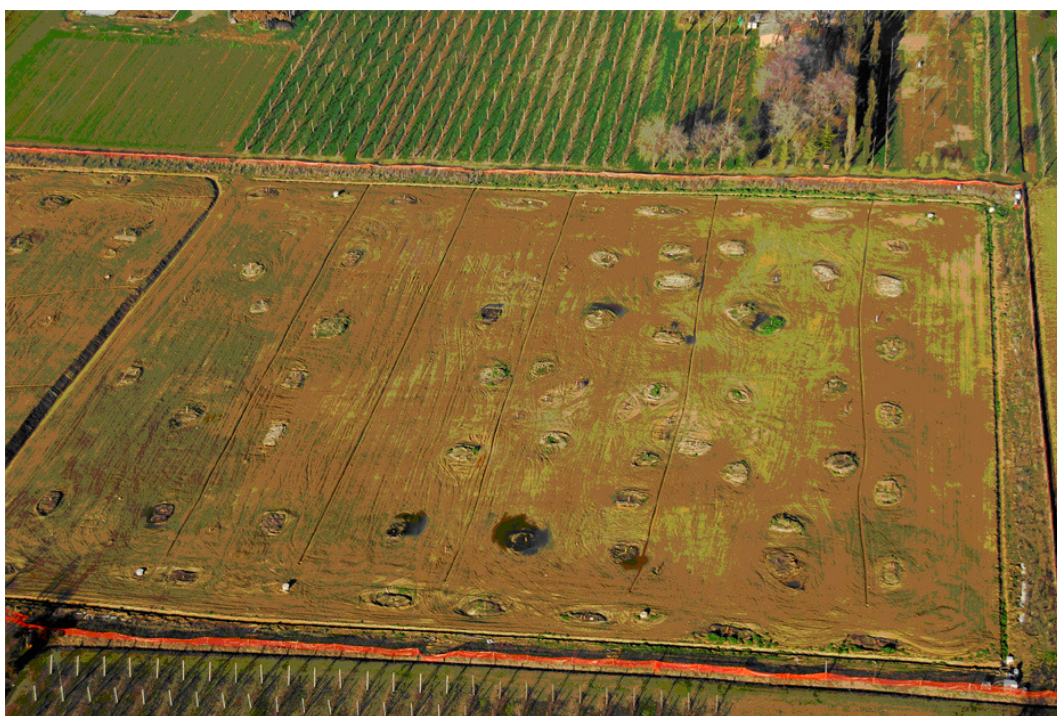


Figura 4.6: Vista aerea di una porzione di area (Fabbri, 2008)

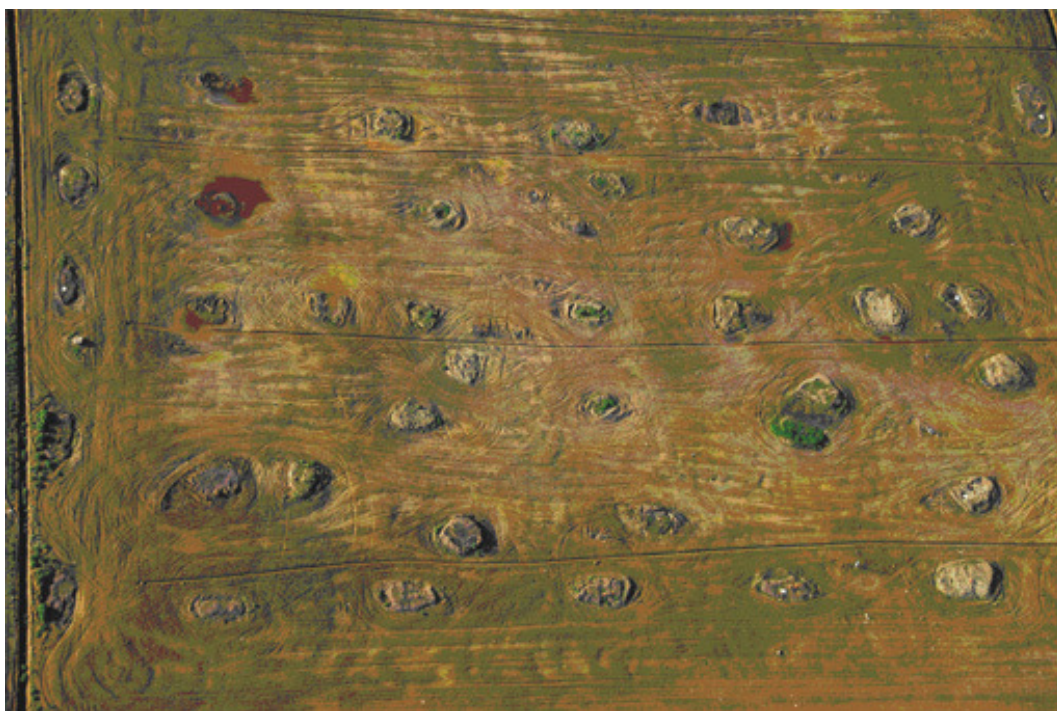


Figura 4.7: Vista aerea di una porzione di area (Fabbri, 2008)

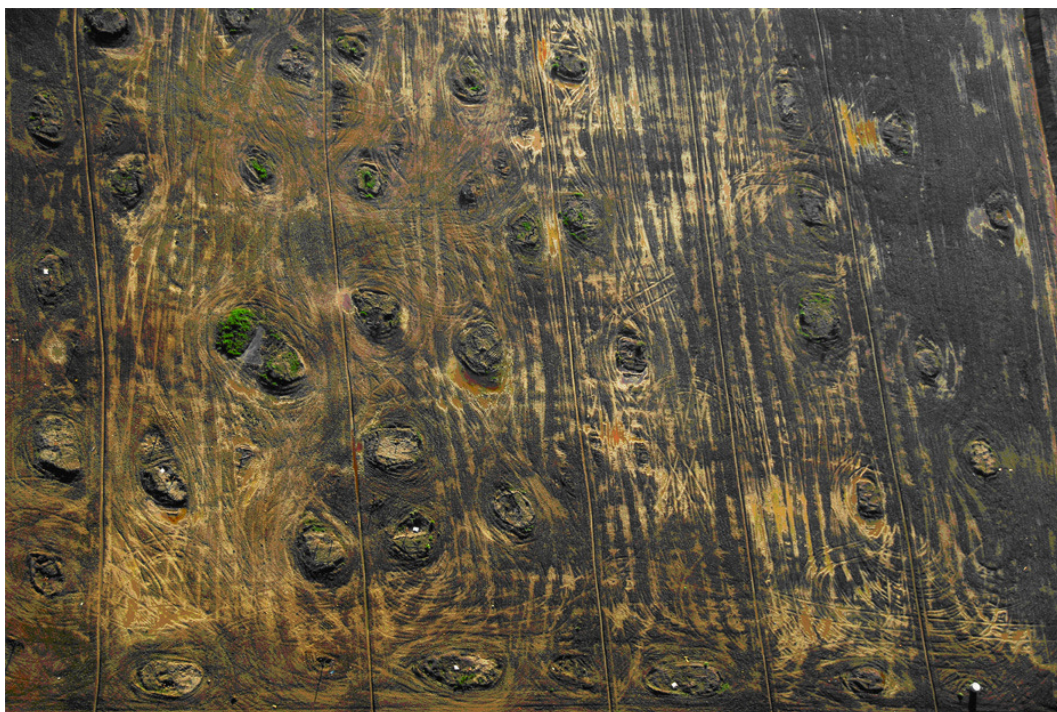


Figura 4.8: Vista aerea di una porzione di area (Fabbri, 2008)

4.3 Cronologia del monitoraggio della fase gas

In parallelo agli interventi di messa in sicurezza permanente del sito, è stato condotto un attento programma di monitoraggio delle fasi gas, liquida e solida, mediante cui verificare, nel corso del tempo, i risultati della tecnica fisico/biologica di bonifica applicata nel sito in esame.

I due capitoli successivi della presente Tesi si focalizzeranno sulla metodologia utilizzata ed i risultati del monitoraggio in corso d'opera della fase gas; per quanto riguarda il monitoraggio delle fasi liquida e solida, invece, si rimanda alla Tesi di Laurea "Sistemi di controllo di processi di biostabilizzazione in situ" (Mordarelli, 2008).

Analogamente alla cronistoria degli eventi del "Fondo Colmbarotto", si riporta in Figura 4.9 uno schema della cronologia del programma di monitoraggio della fase gas, eseguiti a partire da giugno 2006, fino ad agosto 2009.

In particolare si sono susseguite le seguenti fasi:

- Monitoraggio dei piezometri dell'intervento pilota, C: t=0 giugno 2006
- Monitoraggio interno all'area
 - dei piezometri, G (intervento al 70% dell'area): t=0 ottobre 2006
 - dei piezometri, G (completamento dell'intervento): t=0 agosto 2007
- Monitoraggio dei biofiltri, M e B: t=0 luglio 2007

I dati di monitoraggio sono stati anche utilizzati per valutare la completezza dell'intervento attuato e l'eventuale necessità di integrazioni, con la stessa tecnologia oppure con altre tecnologie.

Per quanto riguarda l'ubicazione dei punti di monitoraggio sopra citati si rimanda al capitolo 5.

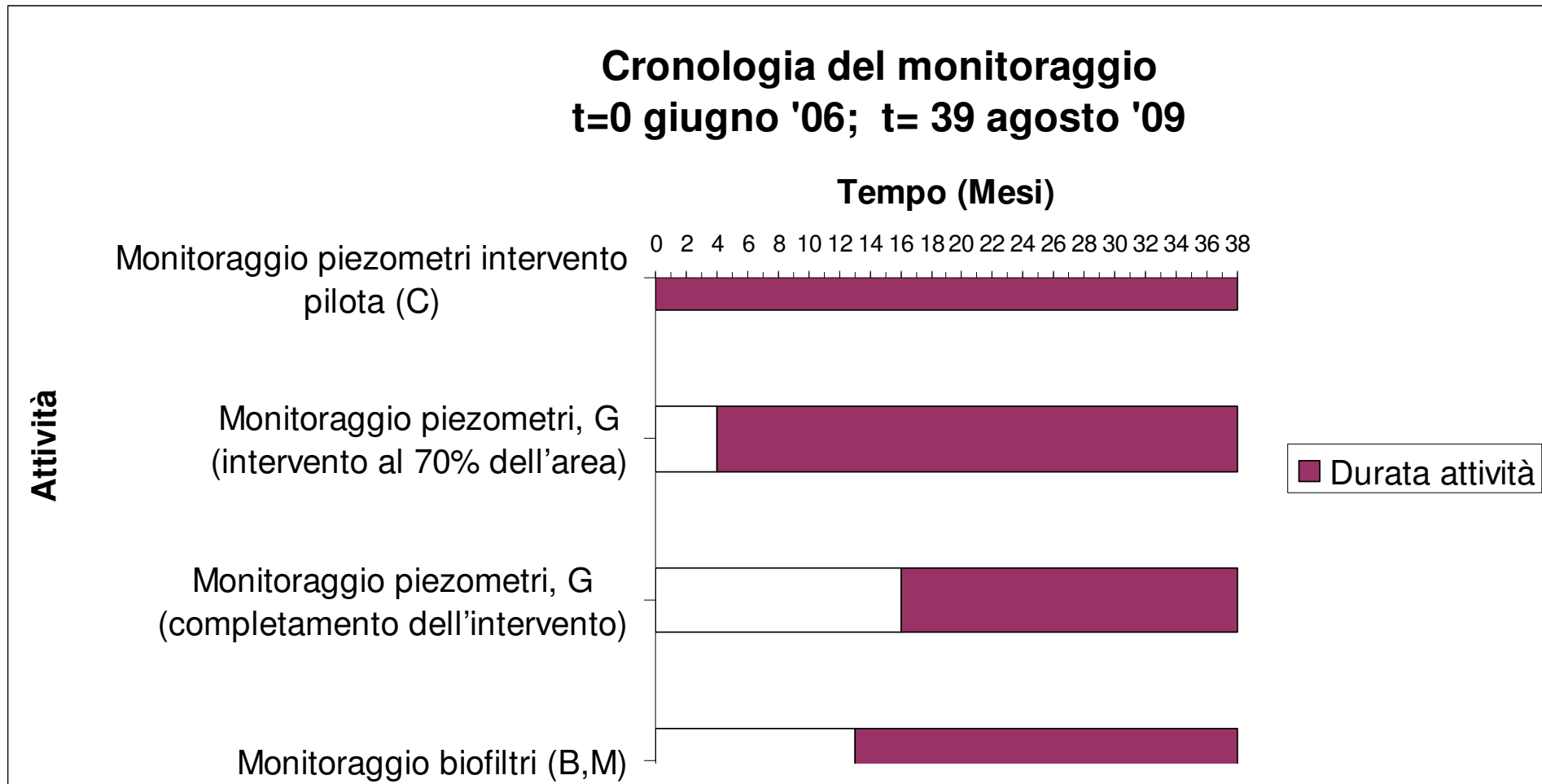


Figura 4.9: Programma di Monitoraggio del Biogas (t=0 coincide con giugno 2006 – inizio del monitoraggio)

4.4 Scelta della tecnologia

Per quanto riguarda la scelta della tecnologia adottata, il primo passo è stato quello di definire una tecnologia di Bioremediation atta ad ottenere condizioni di messa in sicurezza permanenti; per fare ciò è stato necessario valutare alcuni aspetti, quali (Dall'Ara *et al.*, 2009):

- esistono parecchi riferimenti scientifici relativi al controllo della produzione di biogas in discarica ed alla biorimediazione di siti contaminati da inquinanti organici (soprattutto idrocarburi), ma non sono presenti casi studio simili a quello in esame nella presente Tesi;
- sia la legislazione Italiana che quella Europea non prescrivono limiti per la concentrazione di biogas nel suolo, ed il metano non è considerato fra i contaminanti;
- le investigazioni geofisiche condotte all'interno dell'ex-area di cava, a seguito dell'inconveniente ambientale verificatosi, hanno mostrato un utilizzo improprio dei fanghi durante la fase di ripristino ambientale poiché in diversi punti non sono stati miscelati con il terreno secondo le percentuali volumetriche stabilite dalla norma di riferimento; pertanto le caratteristiche fisiche e chimiche del sito sono risultate variabili in termini di rapporto di miscela fanghi/soilo, di permeabilità, di livello freatico e di concentrazione di biogas.

In conseguenza di ciò, la scelta della tecnologia appropriata per il risanamento del sito è risultata ristretta alle seguenti possibilità (Dall'Ara *et al.*, 2009):

- Rimozione dei fanghi miscelati col terreno e loro successivo trattamento/smaltimento in un impianto autorizzato,
- *Bioventing*,
- *Biopile in situ* e rimozione dei fanghi miscelati col terreno.

Una volta raggiunto l'obiettivo della messa in sicurezza mediante isolamento dell'area (tramite trincea perimetrale) e sistema di aspirazione del biogas (SVE) all'esterno dell'area, sarebbe stato possibile attuare le tecnologie riportate sopra, eventualmente in modo simultaneo, nelle differenti parti dell'area caratterizzate da proprie peculiarità (Dall'Ara *et al.*, 2009).

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

Il secondo passo nella scelta della tecnologia è consistito nella valutazione dal punto di vista ambientale ed economico delle tre tecnologie sopra individuate, tenendo presente il raggiungimento dei seguenti obiettivi (Dall'Ara *et al.*, 2009):

- ridurre la produzione del metano, stimolando la degradazione aerobica dei fanghi, e minimizzarne la concentrazione anche attraverso la bioconversione;
- minimizzare gli inconvenienti per i residenti nelle zone agricole attorno all'ex-area di cava.

La Tabella 4.1 riassume i risultati di tale valutazione sito-specifica.

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

	Impatto Ambientale	Impatto visivo	Durata	Costi	Altri Aspetti	Recupero agronomico del sito
Rimozione dei fanghi miscelati col terreno e loro successivo trattamento/smaltimento in un impianto autorizzato	Molto elevato (impatto acustico, cattivi odori ed emissioni in atmosfera durante la fase di scavo)	Elevato durante la fase di scavo	Breve	Molto elevati	Necessità di terreno e di trasporto all'impianto	Non possibile fino alla fine dei lavori
<i>Bioventing</i>	Basso (impatto acustico ed emissioni in atmosfera a causa del ventilatore)	Medio (a causa dei tubi e dell'attrezzatura)	Lunga	Bassi	Monitoraggio regolare durante le operazioni	Non possibile fino alla fine del risanamento
<i>Biopile in situ</i> e rimozione dei fanghi miscelati col terreno	Elevato (impatto acustico, cattivi odori ed emissioni in atmosfera durante la fase di scavo e a causa sei ventilatori)	Elevato durante la fase di scavo, medio durante la fase " <i>biopile</i> "	Media	Elevati	Monitoraggio regolare durante le operazioni e necessità di compost	Non possibile fino alla fine del risanamento

Tabella 4. 1: Valutazione sito-specifica delle tecnologie applicabili (rimozione della miscela fanghi-suolo, *bioventing*, *biopile in situ*) (Dall'Ara *et al.*, 2009)

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

Dopo aver eliminato la possibilità di nuovi rischi di esplosioni mediante il sistema di aspirazione del biogas attorno al sito (Soil Vapour Exreaction - SVE), le Autorità Locali hanno deciso di superare le tecnologie comunemente usate, sopra riportate, e di autorizzare la sperimentazione di una tecnica innovativa di *Bioremediation*, al fine di ottenere la biostabilizzazione ed il riutilizzo dell'area in tempi ragionevoli (Dall'Ara *et al.*, 2009).

In particolare, i principali vantaggi ambientali ed economici che hanno portato alla scelta della tecnica adottata e descritta nei paragrafi 4.1 e 4.2, sono (Dall'Ara *et al.*, 2009):

- minimizzazione dell'impatto acustico,
- minimizzazione delle emissioni in atmosfera,
- riduzione dell'impatto visivo al termine delle operazioni nel sito,
- mitigazione dell'effetto serra,
- riduzione dei costi di implementazione della tecnologia e gestionali,
- minimizzazione degli inconvenienti per gli abitanti,
- accelerato recupero del sito per l'agricoltura.

Infine, si riporta di seguito uno schema logico (Figura 4.10) relativo alla procedura di attuazione della tecnologia innovativa di *Bioremediation* nel Sito "Fondo Colombarotto", evidenziando la possibilità di sostituire o integrare tale tecnologia qualora non fosse appropriata (Dall'Ara *et al.*, 2009):

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

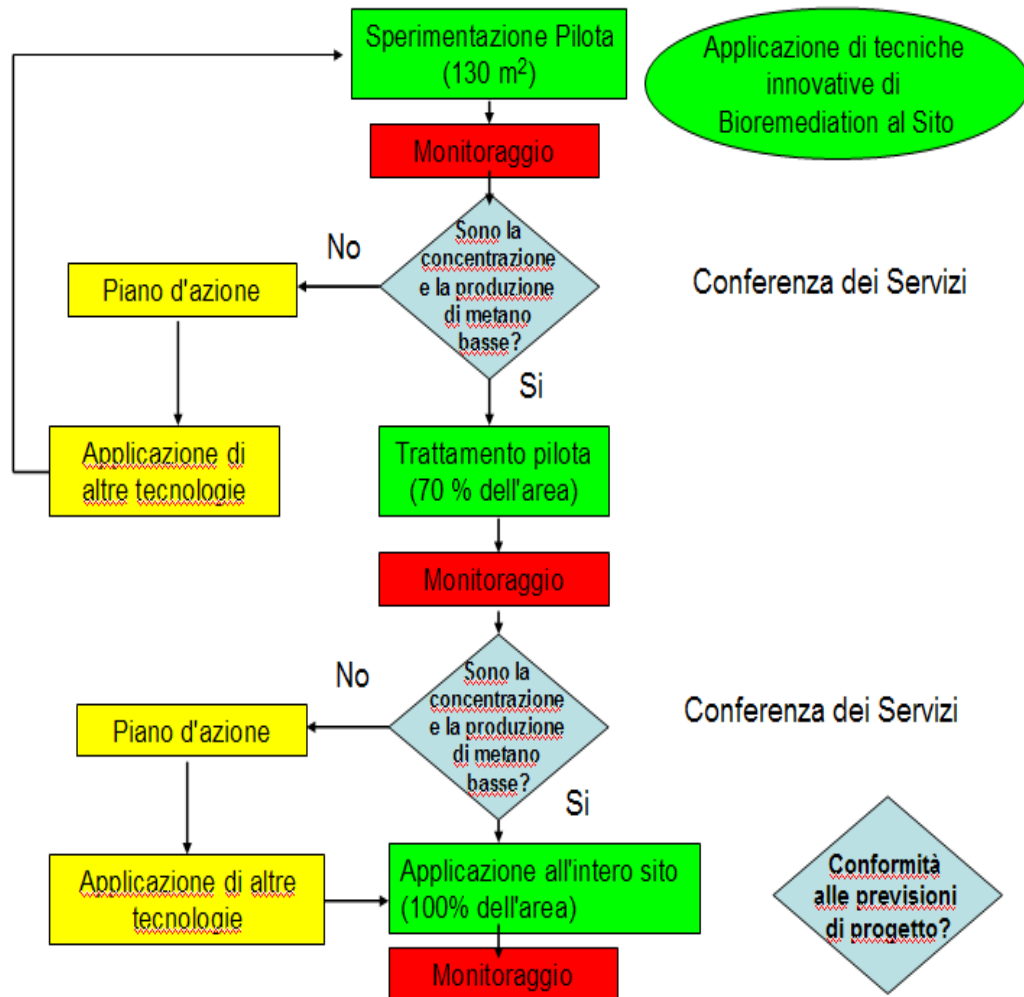


Figura 4. 10: Schema logico della procedura di attuazione della tecnica innovativa di Bioremediation (Dall'Ara *et al.*, 2009)

4.5 Iter amministrativo

Come accennato nel capitolo 1, le indagini condotte nel sito “Fondo Colombarotto”, mirate a verificare se vi erano dei superamenti delle concentrazioni massime sulle matrici acqua e suolo (ai fini di capire se si trattava di un Sito Inquinato ai sensi del DM 471) non hanno riscontrato alcun superamento.

Pertanto, non essendoci contaminazione delle matrici suolo e acqua, non si è ricaduti nell'ambito di applicazione né del Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471, né del Decreto Legislativo 152/2006 (se fosse stato vigente al momento della verifica delle problematiche ambientali), ed in conseguenza di ciò, le indagini e gli interventi sono stati successivamente eseguiti seguendo delle **procedure amministrative specifiche**.

In particolare, l'iter amministrativo adottato in seguito alle esplosioni, verificatesi nel dicembre 2005, non appartiene ad una procedura standardizzata ma è frutto di una valutazione sito-specifica, e può essere articolato secondo tre fasi principali:

- fase di emergenza,
- fase successiva alla messa in sicurezza,
- fase successiva ai risultati ottenuti mediante l'intervento di risanamento.

Ciascuna di esse è caratterizzata da una diversa procedura amministrativa che verrà di seguito riportata.

D) Fase di emergenza

In seguito alle esplosioni verificatesi nel dicembre 2005 nell'abitazione distante 200 metri dall'area di ex-cava, e fin tanto che è perdurata la situazione di pericolo per gli abitanti della zona limitrofa, si è proceduto come di seguito.

- **Segnalazione al Comando dei Vigili del Fuoco** per “fuga di gas in edificio di civile abitazione”, nel corso del quale si è constatato il crollo di una parte di parete interna di laterizio per esplosione della sacca di gas accumulatasi nella retrostante intercapedine.
- **Ordinanza Contingibile e Urgente del Sindaco (n° 1081, 16 dicembre 2005)** per lo sgombero dell'abitazione. In particolare, mediante tale Atto, si dichiara l'inagibilità temporanea dell'unità abitativa e lo sgombero fino

all'accertamento delle cause del pericolo e del ripristino delle condizioni di sicurezza, a seguito di:

- segnalazione ai Vigili del Fuoco di cui sopra;
 - ripetuti controlli strumentali effettuati dai Vigili del Fuoco, a seguito dei quali in un primo momento è emersa la fuoriuscita di gas probabilmente da una valvola di intercettazione mal funzionante e, successivamente, dopo aver effettuato un intervento di manutenzione straordinaria all'impianto di adduzione del gas è stata nuovamente riscontrata la presenza di gas proveniente probabilmente da ogni possibile accumulo nelle intercapedini della muratura e dei solai;
 - riscontro da parte dei Vigili del Fuoco di una grave situazione di pericolo per l'incolumità degli occupanti.
- Successiva **Ordinanza Contingibile e Urgente del Sindaco (n° 1103, 30 dicembre 2005)** alla Ditta C.A.R., responsabile del ripristino ambientale, e al proprietario del terreno per lo svolgimento delle indagini. Con tale Atto si dispone di affidare all'ARPA di Imola la verifica del rispetto dell'Ordinanza stessa, con l'obbligo di riferire al Comune in merito; inoltre si ordina al proprietario dell'area e al Presidente della Ditta C.A.R., in qualità di Direttore dei lavori dell'intervento di ripristino ambientale, di realizzare a proprie spese le opportune verifiche nella zona oggetto dell'intervento al fine di accertare l'eventuale presenza di sostanze organiche atte a originare biogas. Tali verifiche devono comprendere l'effettuazione di carotaggi distribuiti sulla superficie dell'area di riempimento fino alla profondità massima raggiunta dall'intervento di riempimento. Infine l'Ordinanza prevede che i risultati delle indagini vadano comunicati al Comune di Imola ed a ARPA con la massima sollecitudine e nel rispetto dei soli tempi tecnici di laboratorio.
 - **Ordinanza Contingibile e Urgente del Sindaco (n° 206, 20 marzo 2006)**, con cui si ordina al proprietario dell'area e al Presidente della Ditta C.A.R. di provvedere a proprie spese entro il 10 aprile 2006 a smaltire presso impianto autorizzato ai sensi del DLgs. 22/97 tutto il rifiuto (inteso come fango di cartiera tal quale) scavato, ed all'installazione di un sistema di aspirazione idoneo all'estrazione dei gas dai terreni circostanti l'area di

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

ex-cava, ai fini di eliminare qualsiasi forma di pericolo per le abitazioni circostanti. Inoltre si dispone di affidare all'ARPA di Imola la verifica del rispetto di tale Ordinanza con l'obbligo di riferire al Comune in merito.

- **Ordinanza Contingibile e Urgente del Sindaco (n° 285, 14 aprile 2006)**, con la quale si ribadisce quanto esposto nell'ordinanza precedente e si aggiunge l'obbligo per il proprietario dell'area e al Presidente della Ditta C.A.R. di provvedere a spese proprie alla messa in sicurezza dell'area di ex-cava mediante la collocazione, nella trincea già scavata, di un geogriglia atta ad interrompere il flusso di gas nel sottosuolo dalla sede di ripristino verso i terreni confinanti secondo le regole della buona tecnica, e di presentare entro il 20 aprile 2006 un progetto preliminare redatto da un tecnico abilitato per indicare il percorso tecnico e le necessità operative finalizzate alla soluzione delle problematiche emerse nell'area.
 - Successivamente, a seguito della consegna di report o in caso di necessità, si sono realizzati incontri periodici, con presenza delle autorità locali (Comune, ARPA AUSL) e delle ditte interessate (C.A.R. e consulenti), al termine dei quali si procedeva:
 - alla trasmissione dei verbali per puntualizzare alle ditte gli impegni assunti in sede di incontri,
 - a disposizioni dirigenziali, qualora fosse necessario.
- Per esempio, a seguito della riunione del 20 giugno 2006 è stato emesso il verbale n°6, per puntualizzare gli impegni assunti nell'incontro; in particolare tramite tale verbale si prende atto delle prove di biostabilizzazione aerobica effettuate mediante impianto pilota.
- Si è ripetutamente proceduto in questo modo, e con ulteriori Ordinanze Contingibili e Urgenti del sindaco per imporre ulteriori indagini ed interventi, fino alla **revoca dell'Ordinanza di sgombero** (n° 1081, 16 dicembre 2005) il **7 settembre 2006**.

II) Fase successiva alla messa in sicurezza

Ottenuta la messa in sicurezza, e revocata di conseguenza l'Ordinanza di sgombero, non essendoci più una situazione di pericolo si è proceduto secondo un iter diverso dal precedente, non più caratterizzato da Ordinanze Contingibili e Urgenti, schematizzato in figura 4.11:

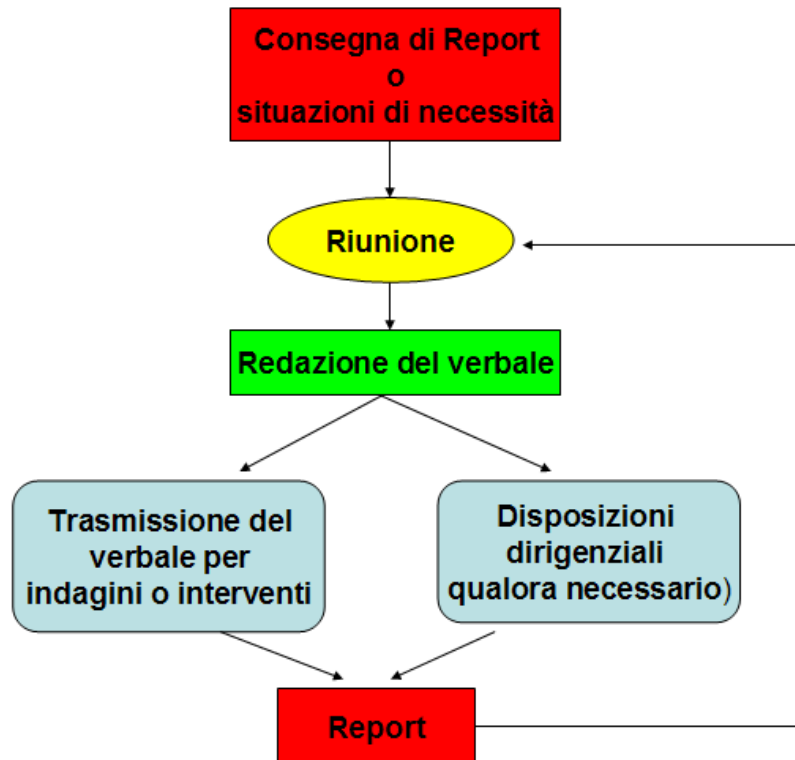


Figura 4. 11: Schema dell'iter amministrativo seguito nella fase successiva al raggiungimento della messa in sicurezza

Si tratta dello schema attuato anche nella prima fase a seguito delle Ordinanze Contingibili e Urgenti del Sindaco. Si è proseguiti in questo modo finchè, finita la fase di sperimentazione, si è richiesto il progetto definitivo di risanamento: con la **Determina Dirigenziale del 13 febbraio 2007** si è passati dalla fase di sperimentazione (“impianto pilota”) all’approvazione del progetto su tutta l’area.

III) Fase successiva ai risultati ottenuti mediante l'intervento di risanamento

- A seguito dei buoni risultati ottenuti mediante l'intervento di risanamento attuato, si è chiusa la seconda fase del procedimento amministrativo, e si è aperta l'ultima fase, caratterizzata ancora una volta da una procedura diversa; lo schema è lo stesso della fase precedente, ma si distingue per una **richiesta di report semestrali**, a cui, come riportato sopra seguono gli incontri e la successiva redazione di verbali e loro trasmissione o disposizioni dirigenziali.

4. Cronologia degli interventi di messa in sicurezza e monitoraggio dell'area

- Infine, con l'**Ordinanza del 2 aprile 2009** è stata disposta la chiusura del procedimento amministrativo, visti i risultati soddisfacenti dell'intervento attuato, ed il proseguimento dell'attività di monitoraggio, sempre con consegna di report semestrali che diano conferma dello stato dell'area e dei risultati del monitoraggio.

5 Il monitoraggio della fase gas

Nella parte iniziale del seguente capitolo verranno riportati alcuni concetti teorici fondamentali relativi ai meccanismi di reazione, che portano alla formazione ed alla degradazione del biogas, ed alle procedure di monitoraggio di tale biogas in discarica.

Successivamente si passerà all'applicazione di tali concetti teorici al caso studio del “Fondo Colombarotto”, analizzando in dettaglio la metodologia del monitoraggio condotto, gli strumenti utilizzati e l'ubicazione dei piezometri di misura.

Come già accennato al termine del capitolo precedente, in questa Tesi si è scelto focalizzare l'attenzione sulla fase gas, rimandando i risultati del monitoraggio condotto sulle fasi solida e liquida a quanto già ampiamente esposto nella Tesi di Laurea “Sistemi di controllo di processi di biostabilizzazione in situ” (Mordarelli,2008).

5.1 Meccanismi di formazione del biogas (CH_4)

I fanghi di cartiera costituiscono una biomassa ad elevato contenuto organico, essendo formati soprattutto da materiali cellulosici e fibre di legno, altamente biodegradabili. Come è noto, l'instaurarsi di condizioni anaerobiche determina metanogenesi e, nel caso specifico, data l'elevata quantità di fanghi presente, si ha un'ingente produzione di biogas. Questo è, infatti, il prodotto finale delle reazioni di respirazione anaerobica, la cui formazione perdura nel tempo con modalità (cinetiche) funzione delle condizioni chimico-fisiche: pressione, temperatura, concentrazione di elementi tossici ed eventuale apporto di ossigeno.

La respirazione aerobica prevede invece come prodotto finale, al termine del processo di mineralizzazione, la produzione di diossido di carbonio (CO_2) ed acqua (H_2O). La produzione di metano (CH_4) può essere una reazione secondaria del processo, circoscritta in zone in cui, per motivi strutturali, si creano condizioni anossiche od anaerobiche (ANPA ed ONR, 2002).

Entrando nel dettaglio, il processo di *decomposizione aerobica* dei carboidrati e dunque della cellulosa e dell'emicellulosa, principali responsabili della formazione di metano, può essere suddiviso in più *step* come riportato in fig. 5.1.

5. Il monitoraggio della fase gas

Il primo *step* è l'idrolisi della cellulosa e di alcune emicellulose in monosaccaridi (1), seguita dalla loro fermentazione con produzione d'etanolo (2). L'etanolo è poi ossidato ad acetaldeide ed acido acetico (3,4). Fino a questo punto risulta ridotta sia la quantità d'ossigeno necessario (solo 3 e 4) sia quella di diossido di carbonio prodotto (2). Per la produzione di quest'ultimo risulta critico il passaggio successivo (5): l'acido acetico può inibire la decomposizione microbica. La CO₂ può essere rimossa con l'aggiunta di carbonato di calcio (7)¹². Se il diossido di carbonio viene asportato e la biomassa risulta anossica, si ha la decarbossilazione dell'acido acetico in metano (8); se invece la CO₂ è rimossa e non si ha deficienza di ossigeno, l'acido acetico è ossidato a diossido di carbonio ed acqua (5): tale reazione determina un aumento della temperatura come conseguenza del rilascio d'energia (Jakobsen, 1992).

$(C_6H_{10}O_5)_n + n H_2O$	→	$n C_6H_{12}O_6$	(1)
$C_6H_{12}O_6$	→	$2 CH_3CH_2OH + 2 CO_2$	(2)
fermentation into ethanol			
$2 CH_3CH_2OH + O_2$	→	$2 CH_3CHO + 2 H_2O$	(3)
oxidation into acetaldehyde			
$2 CH_3CHO + O_2$	→	$2 CH_3COOH$	(4)
oxidation into acetic acid			
$2 CH_3COOH + 4 O_2$	→	$4 CO_2 + 4 H_2O$	(5)
oxidation into carbon dioxide and water			
$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$	→	$6 CO_2 + 6 H_2O$	(6)
gross reaction			
$CO_2 + H_2O + CaCO_3$	⇌	$Ca (HCO_3)_2$	(7)
CH_3COOH	→	$CH_4 + CO_2$	(8)
decarboxylation into methane			
$C_6H_{10}O_5 + 6 O_2$	→	$6 CO_2 + 5 H_2O$	(9)

Figura 5. 1: Reazioni chimiche durante la decomposizione dei carboidrati
(Jakobsen, 1992)

La decomposizione dell'emicellulosa, della cellulosa e della lignina però richiede, data la loro complessità strutturale, tempi molto lunghi, con ordini di grandezza di anni, in funzione delle condizioni operative (pressione e temperatura). Infatti, la cellulosa è un carboidrato polisaccaride di formula bruta $[C_6H_{10}O_5]_n$, formato dalla condensazione di un numero molto elevato di molecole di glucosio, collegate fra loro con legami del tipo β -1 → 4 glicosidico. Chimicamente si assiste

¹² Nel caso in esame il carbonato di calcio dovrebbe essere presente in alcune tipologie di fanghi di cartiera utilizzati nel sito di ripristino.

prima alla frammentazione della macromolecola ed alla formazione di un disaccaride, il cellobiosio ed infine di glucosio (fig. 5.1). A rendere difficoltosa la degradazione chimica della cellulosa è la lignina, che rende indisponibile un'adeguata area superficiale per l'attacco microbico del polimero, in quanto le sue catene polimeriche si insinuano fra le fibrille della cellulosa (Haugh, 1980). La lignina è un biopolimero aromatico, con struttura tridimensionale, che va ad inserirsi fra gli altri costituenti della parete cellulare, attraverso legami covalenti con la cellulosa, l'emicellulosa e le proteine [www.wikipedia.org].

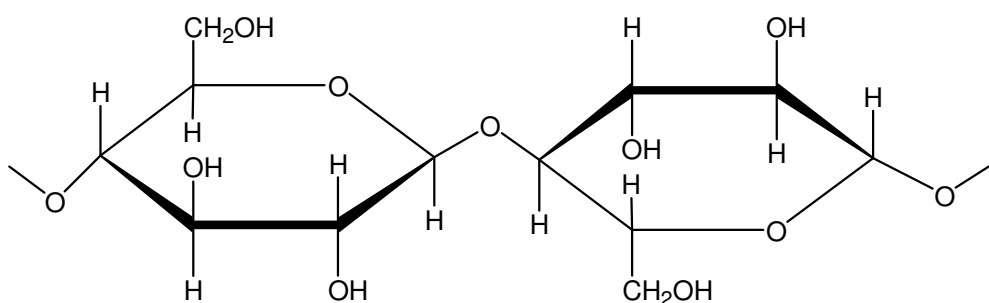


Figura 5. 2: Struttura della cellulosa [www.wikipedia.org]

Per quanto riguarda la **degradazione in condizioni anaerobiche**, le sostanze ad alto peso molecolare come polisaccaridi vengono convertiti a metano (CH_4), mediante l'interazione cooperativa di diversi gruppi fisiologici di procarioti. In molti ambienti anossici i precursori immediati del metano sono l'idrogeno (H_2) ed il diossido di carbonio (CO_2), substrati generati dall'attività degli anaerobi fermentanti. Nella conversione a metano di un polisaccaride come la cellulosa sono coinvolti complessivamente almeno cinque gruppi fisiologici di procarioti (Tabella 5.1 e Figura 5.3). I batteri cellulosolitici idrolizzano le molecole ad alto peso molecolare della cellulosa in cellobiosio (glucosio-glucosio) ed in glucosio libero. Il glucosio viene fermentato dagli anaerobi fermentanti e viene prodotta una grande varietà di prodotti finali, tra cui i più comuni sono acetato, propionato, butirato, alcoli, H_2 e CO_2 . Tutto l'idrogeno prodotto nei processi fermentativi primari viene immediatamente convertito dai metanogeni, dagli omoacetogeni o dai solfato-riduttori. Inoltre, alcuni metanogeni sono in grado di convertire l'acetato in metano (Brock, 1995).

5. Il monitoraggio della fase gas

Tipo di reazione	Reazione	Variazione di energia libera (kJ/reazione)	
		$\Delta G^{\circ(b)}$	$\Delta G^{(c)}$
Fermentazione del glucosio ad acetato, H_2 e CO_2	$Glucosio + 4 H_2O \rightarrow 2 CH_3COO^- + 2 HCO_3^- + 4 H^+ + 4 H_2$	-207	-319
Fermentazione del glucosio a butirrato, CO_2 e H_2	$Glucosio + 2 H_2O \rightarrow 2 CH_3CH_2COO^- + 2 HCO_3^- + 2 H_2 + 3 H^+$	-135	-284
Fermentazione del butirrato ad acetato e H_2	$Butirrato + 2 H_2O \rightarrow 2 CH_3COO^- + H^+ + H_2$	+48,2	-17,6
Fermentazione del propionato ad acetato, H_2 e CO_2	$Propionato + 3 H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + H_2$	+76,2	-5,5
Metanogenesi da H_2 + CO_2	$4 H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3 H_2O$	-136	-3,2
Metanogenesi da acetato	$Acetato + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$	-31	-24,7
Acetogenesi da H_2 + CO_2	$4 H_2 + 2 HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_3COO^- + 2 H_2O$	-105	-7,1

(a) Fonte: Zinder, S. 1984. American Society for Microbiology News 50: 294-298.
(b) Condizioni standard: soluti, 1M; gas 1 atmosfera.
(c) Concentrazione dei reagenti in un tipico ecosistema anaerobico: acidi grassi, 1mM; HCO_3^- , 20 mM; glucosio, 10 μ M; CH_4 , 0,6 atm; H_2 , 10^{-4} atm.

Tabella 5. 1: Principali reazioni nella conversione di composti organici a CH_4
(Brock, 1995)

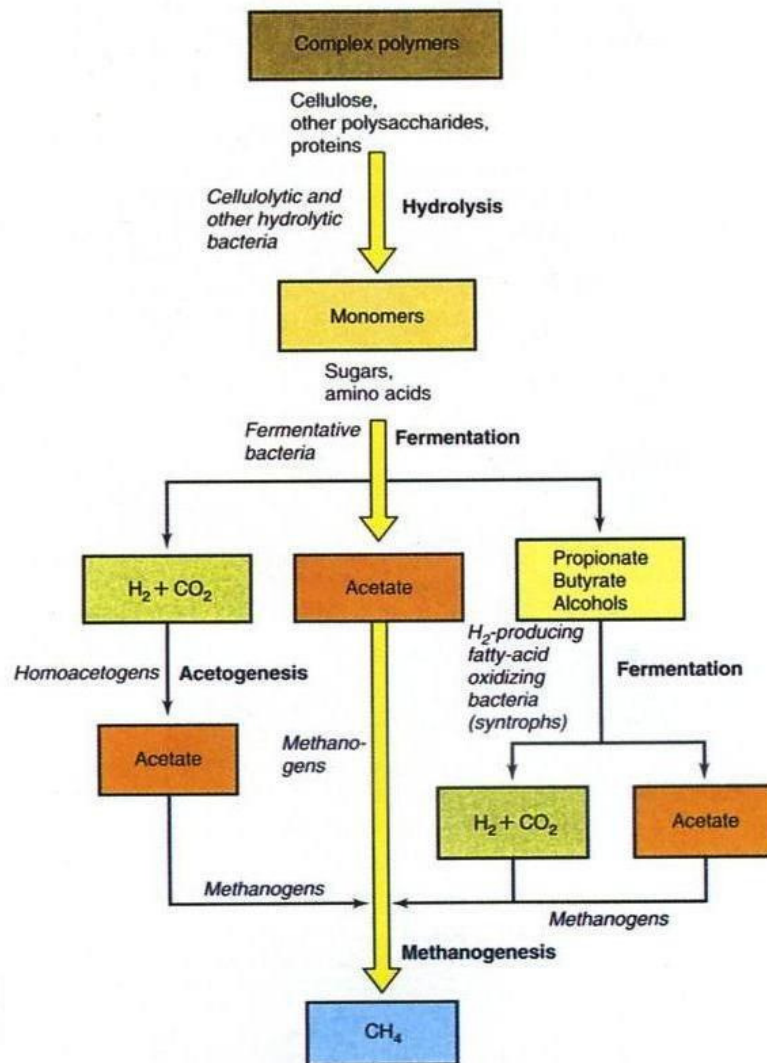


Figura 5. 3: Processo complessivo della degradazione anaerobica (Brock, 1995)

Il carbonio contenuto nella lignina si è mostrato recalcitrante alla degradazione in condizioni anaerobiche. La cellulosa e l'emicellulosa invece si assume si decompongano per l'80%. Bingemer e Crutzen (1987) suggeriscono che per considerazioni a lungo termine, la porzione di carbonio organico degradabile assimilata inizialmente all'interno di biomasse microbiche, rimane disponibile come carbonio decomponibile e possa eventualmente essere dissimilata (Pier & Kelly, 1997).

5.2 Sistemi di monitoraggio del biogas in discarica

Per il controllo dei rischi cui sono soggetti bersagli sensibili nel caso di discariche, diventa essenziale il sistema di monitoraggio del biogas prodotto (Modarelli, 2008).

Bisogna ricordare che i dati raccolti con il monitoraggio alle discariche non necessariamente riflettono i livelli di contaminazione cui le persone sono esposte. Tali informazioni offrono indicazioni generali sulla qualità dell'aria, sulla migrazione del biogas o sui possibili rischi per la salute delle persone. In generale, il monitoraggio dei gas che sono emanati dalle discariche ricade all'interno delle seguenti cinque categorie [www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch4.html]:

- Il monitoraggio del gas contenuto all'interno del suolo;
- Il monitoraggio del gas vicino alla superficie;
- Il monitoraggio delle emissioni (emissioni diffuse);
- Il monitoraggio dell'aria (ambiente);
- Il monitoraggio dell'aria all'interno degli ambienti (*indoor*).

Lo stesso approccio può essere applicato al caso di ripristini ambientali contenenti rifiuti organici, da recuperare congruentemente con la normativa, che producono biogas.

I programmi di monitoraggio del biogas nel suolo misurano le concentrazioni delle sostanze chimiche presenti nei pori del terreno. Le misure dei livelli del gas vengono effettuate in profondità con l'ausilio di sonde o pozzi. I programmi di monitoraggio delle emissioni misurano la velocità alla quale le sostanze chimiche sono rilasciate da una particolare sorgente, come dalla superficie delle discariche o dai camini.

La collocazione dei punti di monitoraggio delle discariche e delle aree adiacenti può avvenire sotto la superficie, in superficie, od all'interno di spazi chiusi (Modarelli, 2008):

- **Sistemi sottosuperficiali.** I sistemi sottosuperficiali misurano le concentrazioni dei contaminanti nel biogas contenuto nel terreno, in posizioni al di sotto dell'interfaccia aria-suolo.
- **Sistemi superficiali.** I sistemi superficiali misurano le concentrazioni di gas appena sopra l'interfaccia aria-suolo (entro 5 cm).
- **Sistemi per spazi chiusi.** I sistemi di monitoraggio dei gas in ambienti chiusi si collocano in aree confinate come costruzioni, cantine, servizi pubblici, od in altri spazi dove il potenziale per la crescita del biogas ha attinenza, che stanno all'interno od in adiacenze delle discariche stesse.

5.2.1 Raccolta dei campioni di gas

I campioni del gas contenuto nel terreno sono raccolti per mezzo di sonde di monitoraggio temporaneo, inserite in pozzi di monitoraggio permanente ed in pozzi di raccolta ed aspirazione del biogas. I metodi di campionatura e la localizzazione dei campioni del gas variano da discarica a discarica, in funzione delle esigenze o dei requisiti di legge (Modarelli, 2008).

5.2.2 Informazioni dal monitoraggio del gas

I risultati del monitoraggio del biogas contenuto nel suolo possono fornire un gran numero di informazioni circa i gas presenti all'interno della discarica, quali il metano ed i NMOCs e come questi si muovono all'interno dell'area ed attraverso il suo perimetro. Importanti fattori da considerare quando si interpretano i risultati sono la collocazione del campione prelevato, la frequenza di campionamento e la qualità dei dati raccolti [www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch4.html].

5.2.3 Pianificazione del monitoraggio del gas

Nel 1991 l'EPA (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente Americana) emanò degli standard per il progetto e l'esecuzione delle discariche, da applicare a quelle attive per la raccolta dei rifiuti solidi urbani a partire dal 9 ottobre 1993. Gli standard richiedevano il monitoraggio del metano e definivano degli standard di

efficacia per il controllo della migrazione dello stesso. Il monitoraggio doveva essere eseguito durante il funzionamento delle discariche ed anche per un periodo di trenta anni dopo la loro chiusura. Le discariche rientranti nel sottotitolo D del RCRA (Resource Conservation and Recovery Act) dovevano effettuare un programma di monitoraggio del gas per testare le emissioni di metano e prevenire le migrazioni fuori sito. I gestori dovevano assicurare che la concentrazione del gas metano non eccedessero (Modarelli, 2008):

- il 25% del limite esplosivo (EL) nelle strutture di impianto (1,25% in volume);
- il Limite Esplosivo Inferiore (LEL) del metano ai perimetri del sito (5% in volume).

5.2.4 Come viene raccolto il gas

Il gas prodotto in discarica può essere raccolto sia attraverso un sistema passivo che attraverso un sistema attivo. Un tipico sistema di raccolta, sia passivo che attivo, è composto da una serie di pozzi per la raccolta del gas, disposti in ogni parte della discarica. Il numero e la suddivisione dei pozzi dipende dalle specifiche caratteristiche della discarica, quali il volume dei rifiuti, la densità, la profondità e l'area. Come il gas viene prodotto nella discarica, i pozzi di raccolta offrono vie preferenziali per la migrazione di questo (Modarelli, 2008).

5.2.5 I sistemi passivi per la raccolta del gas

I sistemi passivi di raccolta per il gas prodotto, usano gradienti di pressione presenti all'interno della discarica e gradienti di concentrazione del biogas per inviare questo in atmosfera od all'interno di un sistema di controllo esistente. I sistemi di raccolta passivi possono essere installati durante le operazioni attive di una discarica o dopo la sua chiusura. I sistemi passivi usano pozzi di raccolta, anche definiti come pozzi di estrazione, per raccogliere il gas prodotto in discarica (Modarelli, 2008).

5.2.6 I sistemi attivi per la raccolta del gas

I pozzi modellati per il sistema di raccolta attivo del gas (fig. 5.4) sono considerati i mezzi più efficaci per la raccolta del gas prodotto in discarica (EPA, 1991). I sistemi attivi per la raccolta includono pozzi verticali ed orizzontali simili a quelli

5. Il monitoraggio della fase gas

passivi (fig. 5.5). Diversamente da questi ultimi, quelli attivi dovrebbero avere valvole per regolare il flusso del gas e servire come supporto di campionatura.

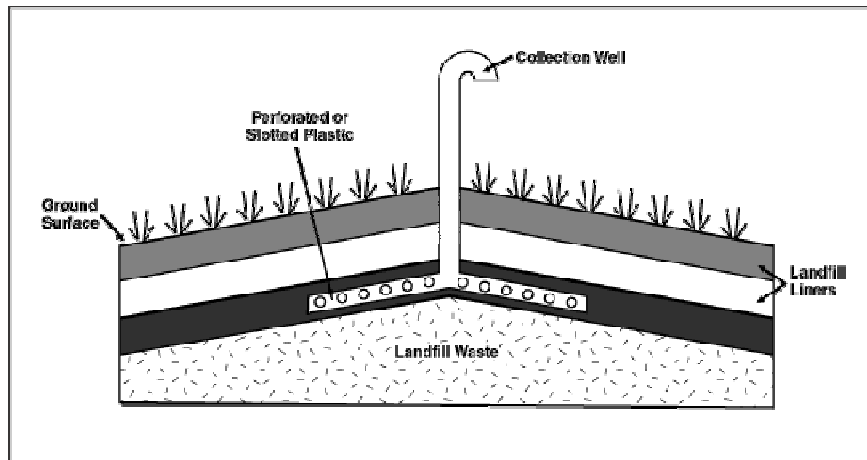


Figura 5. 4: Sistema passivo di raccolta del gas
[www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch5.html]

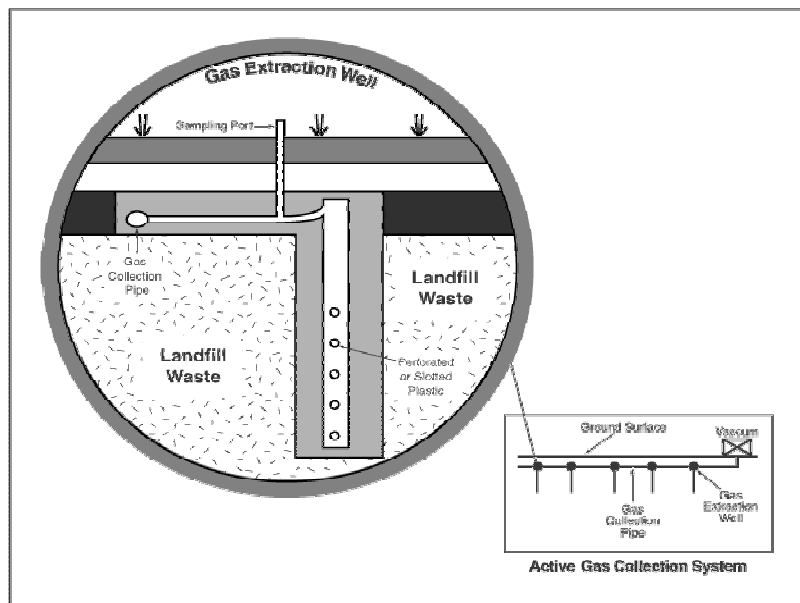


Figura 5. 5: Sistema attivo di raccolta del gas
[www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch5.html]

5.2.7 Metodi disponibili per il controllo del biogas nel caso in cui questo raggiunga le strutture limitrofe

Per prevenire fenomeni di migrazione di biogas verso le costruzioni nelle aree adiacenti alla discarica, l'approccio migliore è quello di controllarlo sin dalla sorgente, la discarica (Modarelli, 2008).

I due approcci base per prevenire che i gas si introducano all'interno di una costruzione sono il controllo della pressione del gas (vedi paragrafo successivo) e l'eliminazione delle vie di ingresso disponibili e delle infiltrazioni.

Esistono alcuni semplici controlli di base per ridurre le vie di ingresso del gas e per limitare la sua migrazione all'interno delle strutture (*indoor*). Se un problema di questo tipo è previsto prima di una costruzione, strategie di controllo possono essere incluse all'interno del progetto, altrimenti possono essere apportate delle modifiche una volta terminata la costruzione.

Indipendentemente dai metodi usati per prevenire o ridurre l'entrata del biogas, i monitoraggi devono continuare con appropriati allarmi che devono essere strategicamente collocati nelle strutture dove sono possibili accumuli fino a livelli esplosivi. I monitoraggi del metano ed i controlli delle strutture devono essere frequentemente revisionati ed avere un programma di manutenzione per assicurare un funzionamento corretto.

5.2.8 Il controllo della pressione del gas

Se la pressione del gas è più bassa all'interno della costruzione rispetto a quella del terreno circostante, il gas può fluire all'interno della struttura. Controllare la pressione del gas può quindi prevenire la migrazione all'interno. Alcune tecniche per il controllo della pressione includono l'aerazione attiva o passiva per ridurre la concentrazione del gas al di sotto della casa, l'aerazione attorno al perimetro della costruzione o del vespaio sottostante. Alcune di queste tecniche possono richiedere l'ausilio di pompe con necessità di manutenzione e consumi energetici (Modarelli, 2008).

5.2.9 Controllo delle aree di fuga

Un altro metodo per far sì che il biogas non entri all'interno delle costruzioni è quello di ridurre od eliminare le vie d'accesso. Il gas può diffondersi all'interno attraverso crepe, brecce, tubi di drenaggio, camini, condotte per l'aria

condizionata o lavori in corso. Migliorare la sigillatura ed il calafataggio delle fondazioni può prevenire crepe e brecce riducendo le vie di entrata al biogas. Tali vie sono comunque soltanto alcune delle strade che un gas può scegliere per entrare all'interno di un edificio. Ancora, un altro metodo può essere quello di creare una linea di bassa permeabilità attorno al basamento della struttura od attorno ad una porzione sotterranea della stessa [www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch5.html].

5.3 Il monitoraggio della fase gas nel sito “Fondo Colombarotto”

In questo paragrafo viene riportata la mappatura del “Fondo Colombarotto”, con l'ubicazione dei punti di monitoraggio del gas e delle trincee al fine di agevolare la lettura dei risultati riportati nel capitolo 6; inoltre si analizzano i materiali ed i metodi di monitoraggio utilizzati.

I dati relativi alle misure della fase gas sono state raccolti in parallelo ad analisi sulla componente liquida (determinazioni di pH e redox dei fluidi interstiziali), atte a studiare le condizioni ossido-riduttive del sito, e vanno “incrociati” con analisi chimico-fisiche della miscela suolo-fango per valutare l'efficacia e la tipologia della biostabilizzazione sulla fase solida (Modarelli, 2008).

Infine, i metodi di misura adottati per valutare l'efficacia dell'intervento sperimentale devono tenere conto dell'eterogeneità della distribuzione di fanghi, sia in senso verticale che orizzontale.

5.3.1 Ubicazione dei punti di monitoraggio

Si riporta in figura 5.6 la mappa contenente l'ubicazione dei punti di monitoraggio del biogas.

Come si evince dalla mappa, e tenendo presente la cronologia riportata nel paragrafo 4.3, il monitoraggio della fase gas è avvenuto all'interno di:

- 21 pozzi/piezometri opportunamente allestiti e distribuiti su tutta l'area contenuta all'interno della recinzione, disposti tra le trincee (5 C e 16 G),
- 29 biofiltri (24 B e 5 M).

5. Il monitoraggio della fase gas

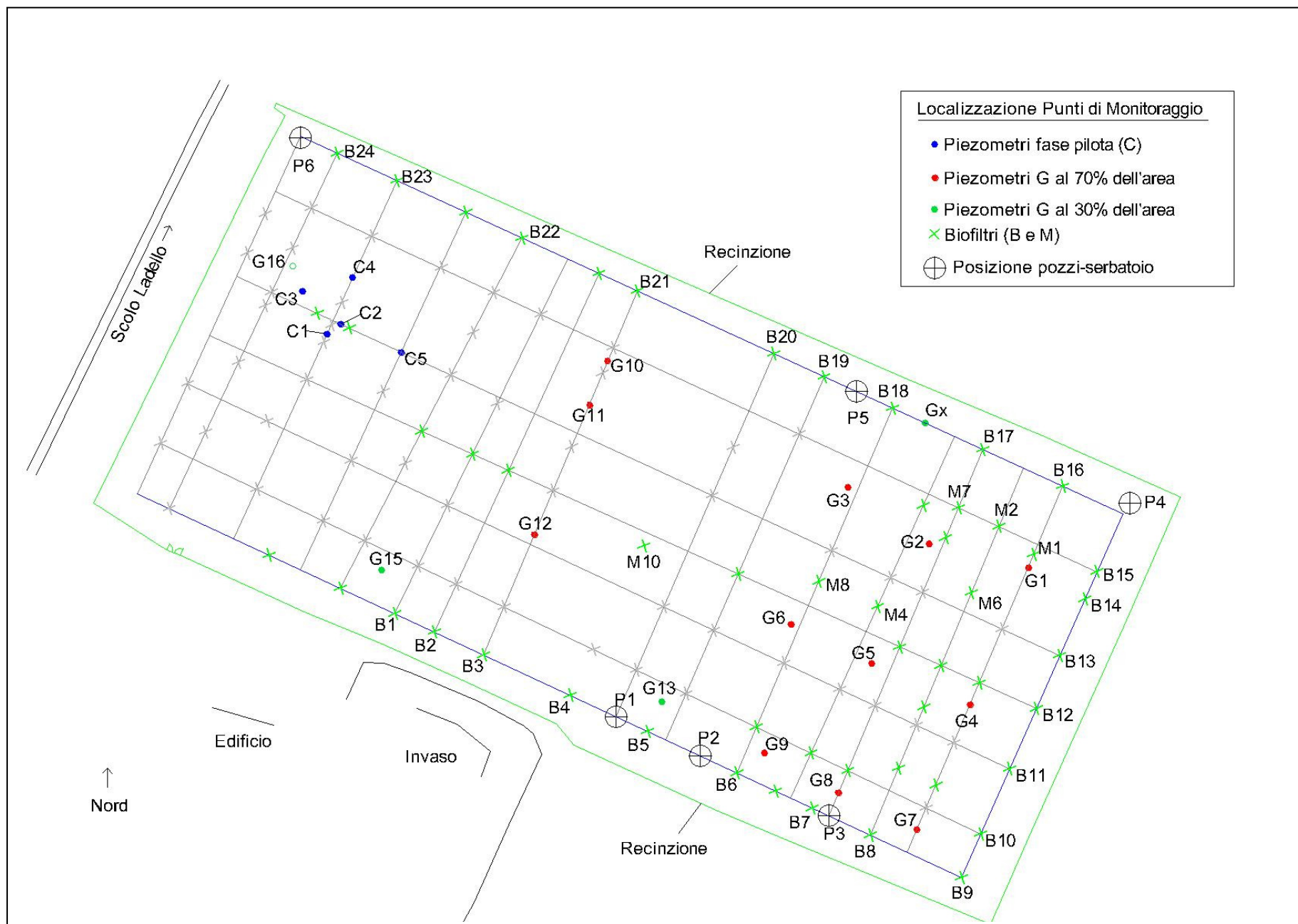


Figura 5. 6:
Ubicazione dei
punti di
monitoraggio

5.3.2 Materiali e metodi

Per il monitoraggio della fase gas sono misurate periodicamente le concentrazioni di CH_4 , CO_2 ed O_2 : infatti il metano è l'indicatore principale della pericolosità della situazione ed in rapporto con la CO_2 indica eventuali modifiche nei processi fermentativi, così come la concentrazione di O_2 , associata con quella del metano, indica di nuovo la pericolosità ma anche la modifica delle condizioni di stabilizzazione (Marroni *et al*, 2008).

Tali concentrazioni sono state misurate attraverso un **Analizzatore di Gas Portatile** (Figura 5.7): **GA2000 PLUS** (Landfill and Environmental Equipment, Geotechnical Instruments, UK), messo a disposizione dalla LabService Analytica Srl.



Figura 5. 7: GA2000 PLUS (Modarelli , 2008)

GA2000 PLUS è uno strumento di campo per l'analisi della digestione anaerobica e della composizione del biogas. Si tratta di uno strumento portatile e facile da usare, ampiamente utilizzato per il monitoraggio del biogas in discarica, e si caratterizza per alcuni vantaggi, quali [www.labservice.it]:

- facilità di utilizzo e di lettura,
- fornisce una consistente raccolta di dati per analisi e reportage precisi,
- download semplice,
- conformità alle norme,
- schermata simultanea della concentrazione di tutti i gas,
- collaudo in campo,
- procedura di monitoraggio standardizzata,
- facile e veloce trasferimento dei dati.

Oltre alle concentrazioni (%) di CH_4 , CO_2 ed O_2 , nella schermata principale vengono forniti anche i valori della pressione barometrica (mbar) e differenziale, nonché la presenza di eventuali incombusti di reazione (% di CO e H_2S).

Per quanto riguarda i punti di monitoraggio, tali concentrazioni sono misurate *in situ* in:

- a) **Piezometri** fessurati a profondità definite (risultato di processi di produzione, accumulo e diffusione/dispersione nell'ambiente circostante). Tali piezometri sono costituiti da sonde realizzate con tecnologia GeoProbe a distruzione di nucleo della lunghezza di 6 metri, forati ad una profondità compresa tra -3 e -5 metri dal p.c., con un diametro compreso tra 1" ed un 1" $\frac{1}{4}$, raccogliendo in tal modo il gas prodotto e diffuso a quel livello (Marroni *et al*, 2008). Si ricorda che i primi due metri sono occupati dal capellaccio di materiale argilloso (Bonoli, 2006).



Figura 5. 8: Piezometri (Modarelli , 2008)

- b) **Biofiltri**: una trincea biofiltro (figura 5.9) consiste in una sezione trapezoidale scavata nel suolo e riempita di compost addittivato di enzimi al fondo della trincea stessa. Essa costituisce una barriera passiva rispetto al gas e serve da cammino preferenziale per il biogas accumulato, nonché è il luogo in cui fare avvenire il fenomeno di bioconversione. In ogni biofiltro sono stati collocati due tubi, alle profondità di 6 metri, forati per il metro finale ed aperti nella parte inferiore, in cui eseguire le misure.



Figura 5. 9: Schema di una trincea biofiltro

Si sottolinea come nei piezometri G e C si eseguono misure dirette delle concentrazioni nel terreno; per quanto riguarda i biofiltri, si tratta di una misura di concentrazione indiretta poiché il biofiltro stesso rappresenta una sorta di “trappola” in cui viene convogliato il biogas e sul cui strato superficiale avviene una modifica della composizione. Nel prossimo capitolo in cui verranno presentati i risultati del monitoraggio, per i G e C si riporterà un valore medio della concentrazione, cosa che non appare significativa per i biofiltri.

Nei biofiltri si procede direttamente alla fase di misura attraverso lo strumento appena menzionato; nei piezometri invece, essendo fessurati, prima di procedere con l'operazione di monitoraggio, si controlla il livello dell'acqua all'interno dei pozzi attraverso il *freatimetro* (Figura 5.10) livello che, a causa della presenza di falde sospese, potrebbe essere troppo elevato. In tal caso (essendo lo spazio a disposizione del gas occupato dall'acqua), per poter eseguire il monitoraggio dei gas, si procede prima con l'operazione di estrazione dell'acqua attraverso una *pompa a membrana* manuale (Figura 5.11) e poi con la misura dei gas dopo il ristabilimento delle condizioni di equilibrio della fase gassosa in prossimità dei fori del piezometro stesso.

La lettura di ogni singolo piezometro o biofiltro viene prolungata fino al raggiungimento di un valore costante (in genere 300 secondi).

Il monitoraggio dei piezometri ha cadenza almeno mensile, mentre il monitoraggio dei biofiltri ha avuto una cadenza più rarefatta.

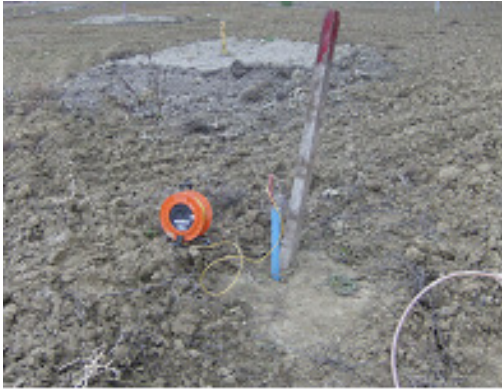


Figura 5.10: Freatimetro
(Modarelli, 2008)



Figura 5.11: Pompa a membrana
(Modarelli, 2008)

- c) Su alcuni biofiltri, infine, sono stati posizionati anche dei punti di monitoraggio superficiali (“**surface box**”) per la misura della concentrazione del biogas nei primi centimetri di compost. Una “surface box” è un contenitore di forma piramidale di volume noto, caratterizzato da un’apertura alla base che, in genere, copre un’area approssimativamente di $0,33\text{-}1\text{ m}^2$, e di solito è bianco al fine di minimizzare gli effetti termici causati dal riscaldamento delle pareti in seguito ad una prolungata esposizione ai raggi solari [http://www.environmentagency.gov.uk/commondata/acrobat/lftgn07_surface_936575.pdf]. Nel nostro caso si utilizzano “surface box” della dimensione di $0,7 \times 0,7 = 0,49\text{ m}^2$, inserite per alcuni cm all’interno del compost (per evitare il convogliamento dell’area esterna) e munite di un’apertura dotata di flange e raccordi per poter effettuare la misura della concentrazione del biogas mediante l’analizzatore di gas portatile GA2000 PLUS, utilizzato per il monitoraggio nei piezometri e biofiltri, e con i medesimi tempi di misura (figura 5.12).



Figura 5. 12: Esempio di “Surface Box”

6 I risultati del monitoraggio

In questo capitolo si riportano i risultati del monitoraggio della fase gas, condotto per un totale di 38 mesi di sperimentazione, ossia a partire da giugno 2006 fino ad agosto 2009 (37 mesi per i piezometri C, 33 per i piezometri G, 25 per i biofiltri B ed M), al fine di valutare lo stato di avanzamento dell'intervento fisico-meccanico e biologico effettuato nel sito "Fondo Colombarotto".

La planimetria contenente l'ubicazione dei punti di monitoraggio che verranno di seguito presentati è riportata nel capitolo precedente.

Per valutare gli obiettivi del risanamento, e quindi del monitoraggio, ci si basa sulla normativa nazionale riportata nel capitolo 1, in cui non sono rintracciabili valori di soglia, pertanto i risultati verranno confrontati con il LEL (Lower Explosive Limit).

6.1 Risultati della sperimentazione nei piezometri (C e G)

In questo paragrafo verranno presentati i risultati della sperimentazione condotta nei piezometri della fase pilota e dell'intervento sperimentale nel suo complesso. Si riporteranno sia gli andamenti nel tempo delle concentrazioni di metano, diossido di carbonio ed ossigeno per diversi piezometri, sia l'andamento della concentrazione media di tutti i piezometri nel tempo (prima e dopo il completamento dell'intervento sul 100% dell'area).

6.1.1 Risultati della fase pilota (piezometri C)

Si riportano di seguito gli andamenti delle concentrazioni di gas misurate nei 5 punti di controllo dell'intervento pilota (figure 6.1-6.5), costituiti da sonde tipo "Nasty Probe", fessurati ad una profondità di (-4, -5 m) e denominati C1, C2, C3, C4, C5, come riportato nel capitolo 5. L'inizio del monitoraggio per tali piezometri coincide con giugno 2006, ed i risultati della sperimentazione sono aggiornati a luglio 2009.

6. I risultati del monitoraggio

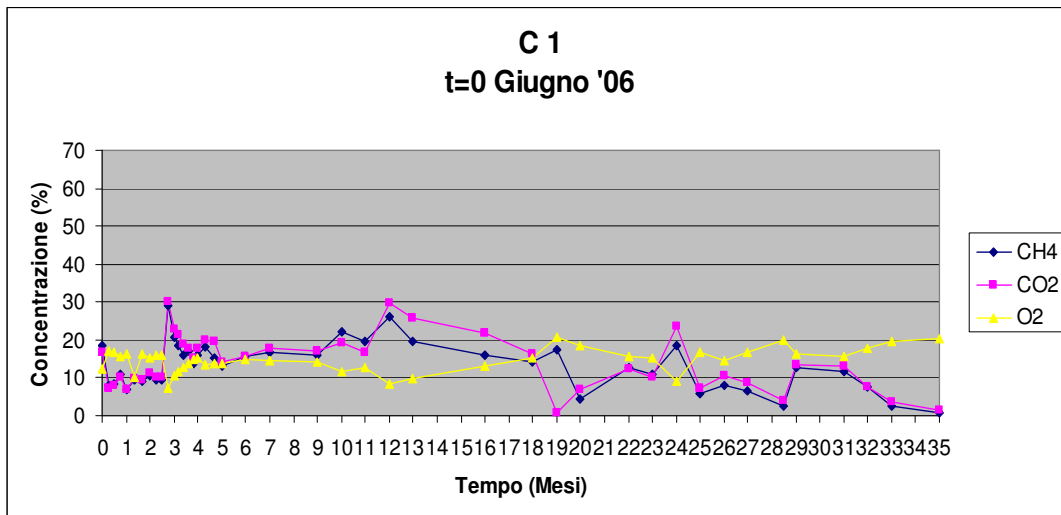


Figura 6. 1: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel piezometro C1

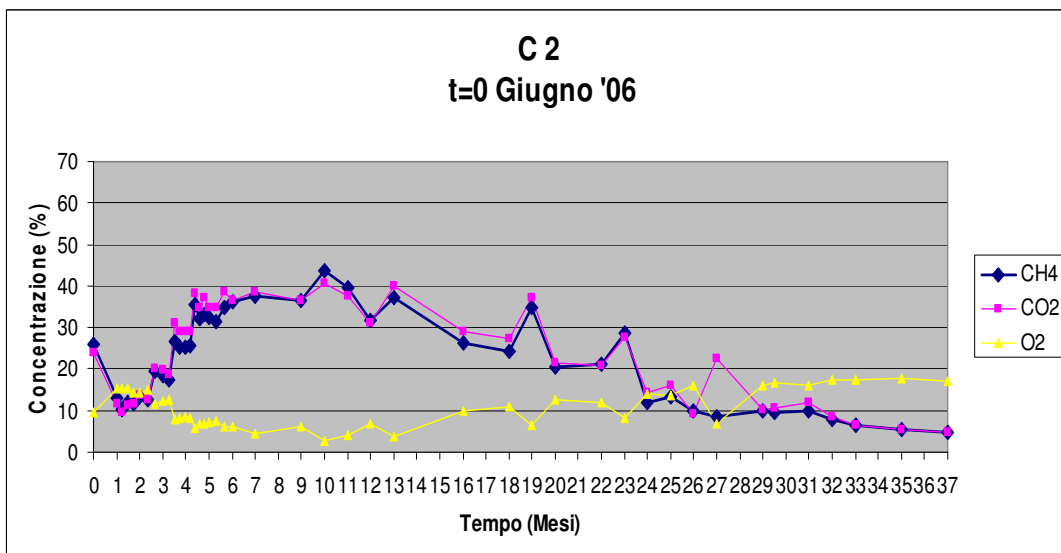


Figura 6. 2: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel piezometro C2

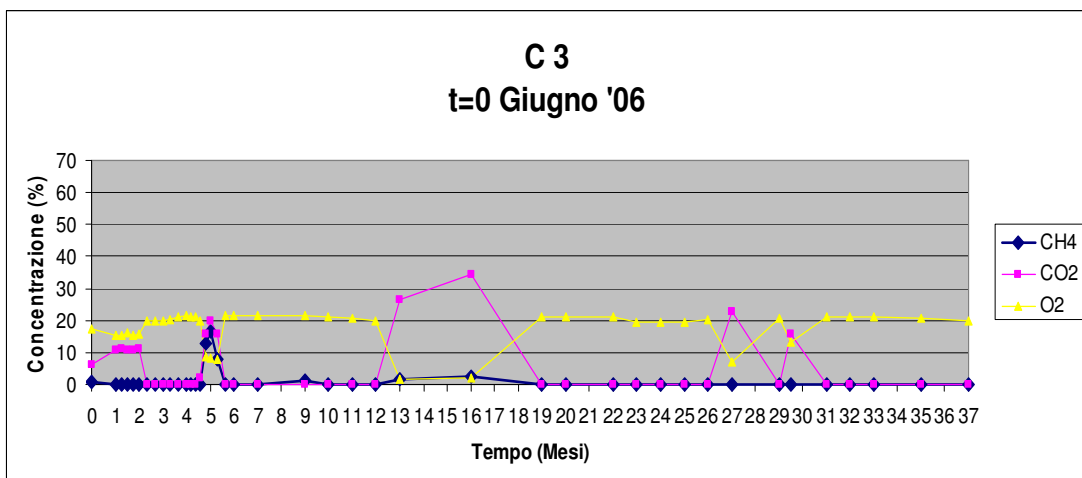


Figura 6. 3: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel piezometro C3

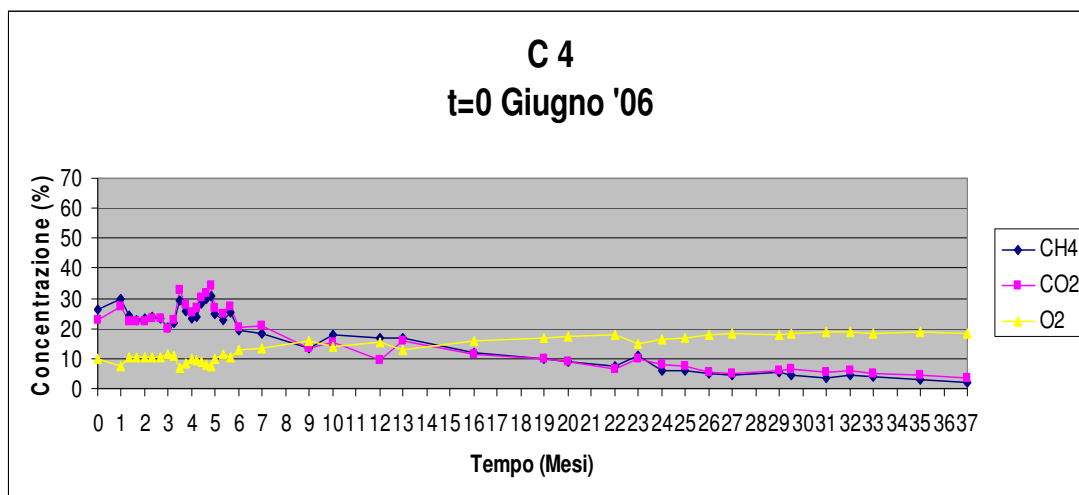


Figura 6. 4: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel piezometro C4

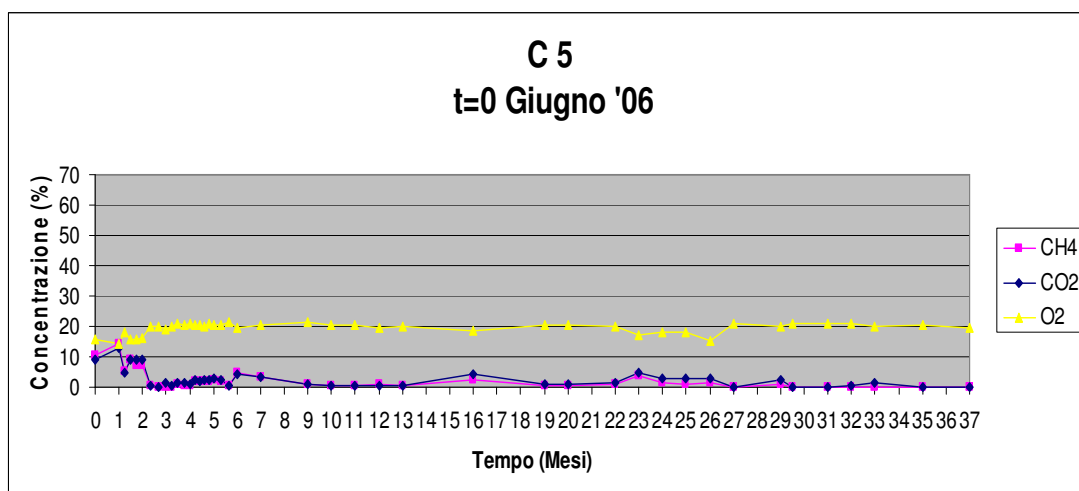


Figura 6. 5: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel piezometro C5

Da tali andamenti si può riscontrare quanto segue:

- Il piezometro C1 può essere considerato un punto di riferimento, altalenante attorno ad un suo valore medio; dopo 30 mesi di sperimentazione si osserva una progressiva riduzione della concentrazione di CH₄ fino ad arrivare al di sotto del LEL (5%).
- Per i primi 24 mesi di sperimentazione nel piezometro C2, posto sulla linea fra due biofiltri, la concentrazione di CH₄ va progressivamente aumentando fino ad oscillare attorno ad un valore medio, segnale del fatto che i biofiltri presentano una via preferenziale di incanalamento del biogas e di camino convettore per la fuoriuscita del gas; nell'ultimo anno di sperimentazione si è poi assistito ad una diminuzione della concentrazione del metano fino ad una sua stabilizzazione al di sotto del LEL.

- Nel piezometro C3 la concentrazione di CH₄ si è mantenuta al di sotto del LEL per tutta la durata della sperimentazione; sono presenti picchi relativi alla concentrazione di CO₂, in concomitanza con punti di minimo della concentrazione di O₂, a testimonianza del fatto che sta avvenendo la bioconversione del metano in anidride carbonica, con consumo di ossigeno.
- Per i primi 8 mesi di monitoraggio, il piezometro C4 può essere considerato un punto di riferimento, altalenante attorno ad un suo valore medio; successivamente si può notare una progressiva diminuzione della concentrazione del metano, fino ad arrivare al di sotto del LEL.
- Infine, per quanto riguarda il piezometro C5, la riduzione della concentrazione di metano è avvenuta rapidamente nei primi due mesi di sperimentazione, e la concentrazione di CH₄ già ad agosto 2006 ha raggiunto valori al di sotto del LEL.

6.1.2 Risultati dell'intervento sperimentale (piezometri G)

Si riportano di seguito alcuni grafici degli andamenti delle concentrazioni di metano, diossido di carbonio ed ossigeno nei piezometri G in 33 mesi di sperimentazione, e precisamente da ottobre 2006 a luglio 2009. Si ricorda che a settembre 2006 è stato realizzato l'intervento sperimentale sul 70% dell'area, ed il completamento dell'intervento fisico-meccanico e biologico è avvenuto nel maggio 2007.

Gli andamenti possono essere suddivisi nelle seguenti tre tipologie:

- a) alcuni piezometri hanno mantenuto un'elevata presenza di biogas (circa 50%) relativa alle concentrazioni di CH_4 e CO_2 durante i primi 12-20 mesi di monitoraggio; alcuni di essi poi mostrano abbassamenti dei valori dopo 12 mesi dal completamento dell'intervento (G9, G1). In seguito mostrano un abbassamento dei valori del metano, con punte sotto al LEL. Si nota anche un rapporto piuttosto costante di 1:1 fra CH_4 e CO_2 .

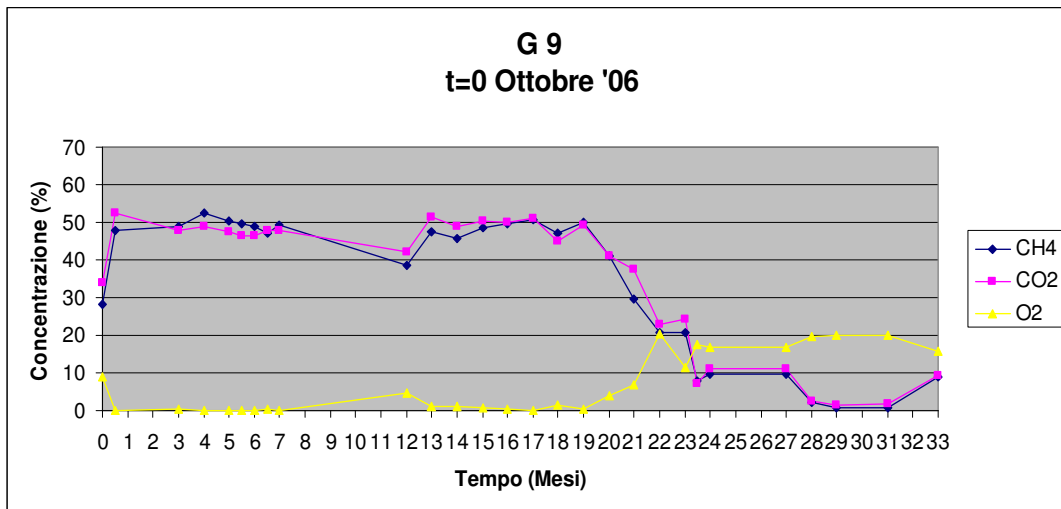


Figura 6. 6: Andamento delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 e O_2 nel piezometro G9

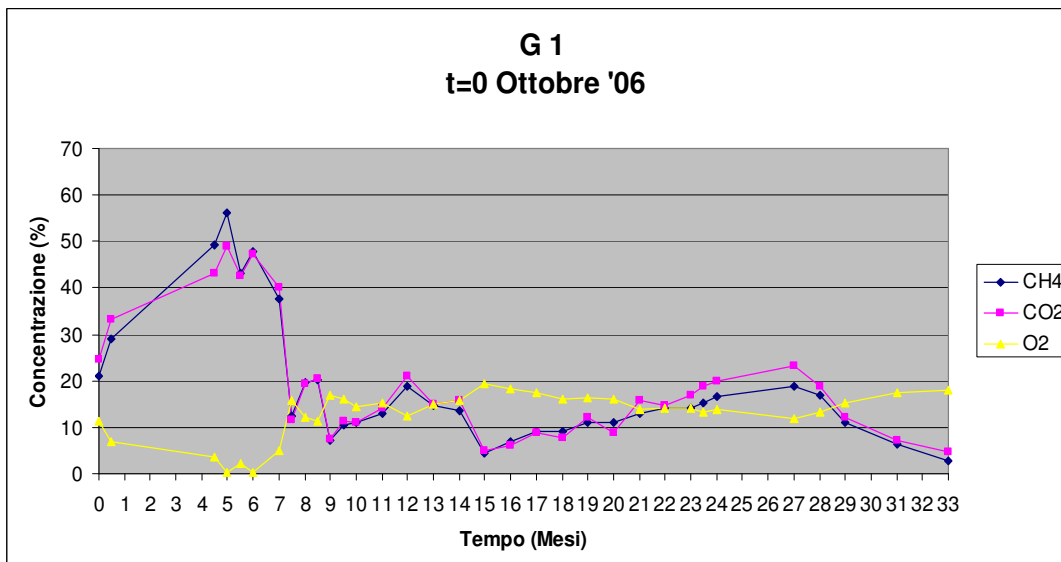


Figura 6. 7: Andamento delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 e O_2 nel piezometro G1

- b) altri piezometri mantengono un livello basso, pressoché nullo, di biogas (G2, G4).

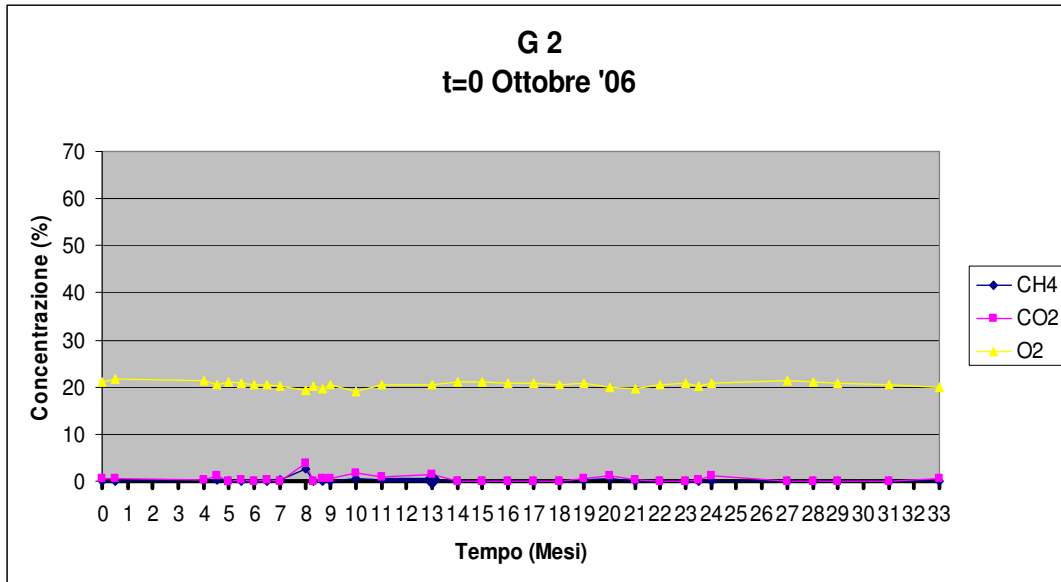


Figura 6. 8: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂ e O₂ nel piezometro G2

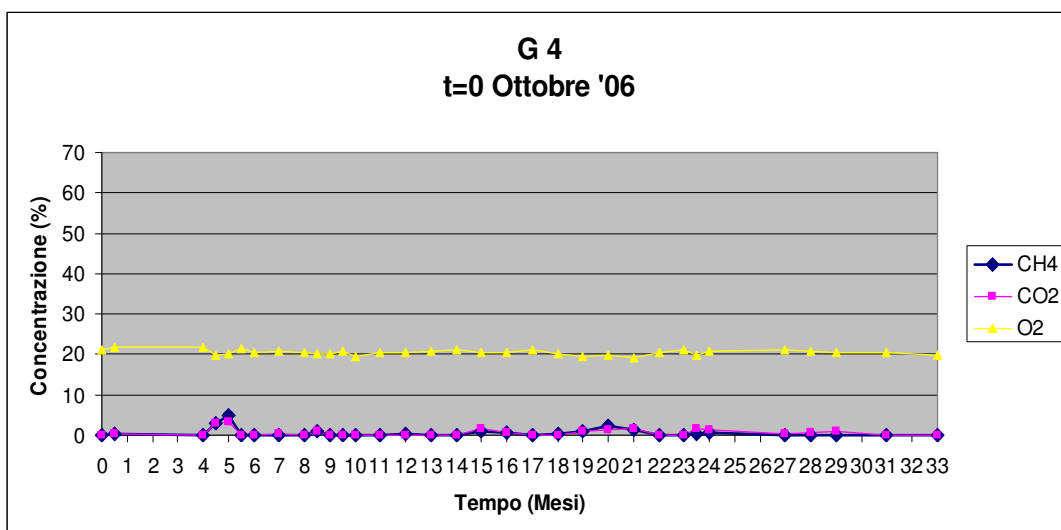


Figura 6. 9: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂ e O₂ nel piezometro G4

- c) infine, certi piezometri presentano andamenti differenti, in relazione al trattamento subito, mostrando un abbassamento nella concentrazione di metano, alcuni al di sotto del LEL (G3).

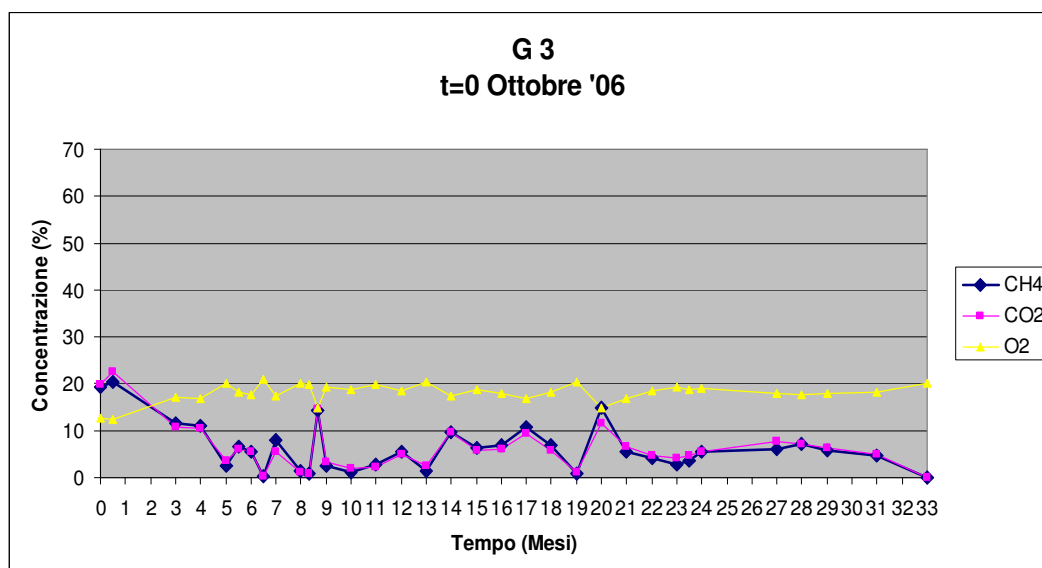


Figura 6. 10: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂ e O₂ nel piezometro G3

Come già riportato in Modarelli *et al.* (2008), i risultati delle determinazioni dell'andamento del gas metano nei singoli pozzi sono stati analizzati con un software utilizzato per la validazione dei metodi analitici (ARPA E.R., 2003). Inizialmente il software controlla se i risultati delle determinazioni ricadono all'interno di una distribuzione normale (test Shapiro-Wilks, 5%). Inoltre, viene verificata la presenza di dati anomali attraverso il test di Huber (della mediana, al 5%). Per ciascun piezometro questi test possono verificare se le concentrazioni di metano misurate appartengono ad una singola popolazione statistica e se ci sono dati anomali, cioè se ci sono differenze significative. Nel caso specifico mettono in evidenza se gli interventi effettuati hanno introdotto modifiche tali da cambiare la distribuzione dei dati e quindi l'appartenenza a popolazioni diverse.

6.1.3 Andamento nel tempo delle concentrazioni medie dei piezometri

Per dare un'idea dell'andamento complessivo della concentrazione del biogas interna all'area, si ritiene utile riportare l'andamento delle concentrazioni medie di metano, biossido di carbonio ed ossigeno in tutti i punti di misura realizzati fino a marzo 2009 (21 piezometri = 5 C + 16 G).

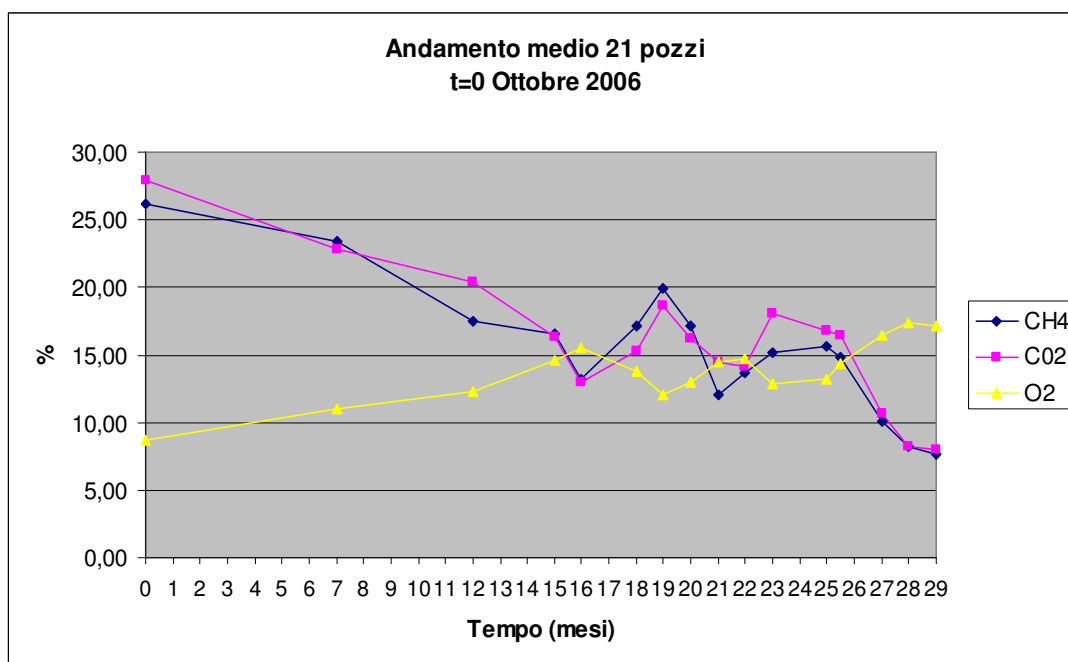


Figura 6. 11: Andamento medio delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ in 21 piezometri

È possibile notare una sostanziale riduzione delle concentrazioni di CH₄ e CO₂ (circa 50%), nonché una progressiva crescita di O₂ nei mesi indagati.

In particolare si distinguono 3 fasi principali:

- una prima fase iniziale di diminuzione di metano ed anidride carbonica,
- una seconda fase di oscillazione attorno ad un valore intermedio,
- una terza fase di riduzione ulteriore delle concentrazioni di metano ed anidride carbonica e soprattutto di inversione tra ossigeno e metano/anidride carbonica. L'ossigeno ha una concentrazione superiore a metano e anidride carbonica.

6.2 Comportamento dei biofiltri (B ed M)

Di seguito verranno presentati i risultati del monitoraggio del biogas condotto all'interno dei biofiltri B ed M.

6.2.1 Monitoraggio all'interno dei biofiltri B

Si riportano di seguito le misure delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 , O_2 misurate sul fondo di alcuni biofiltri (6 metri di profondità).

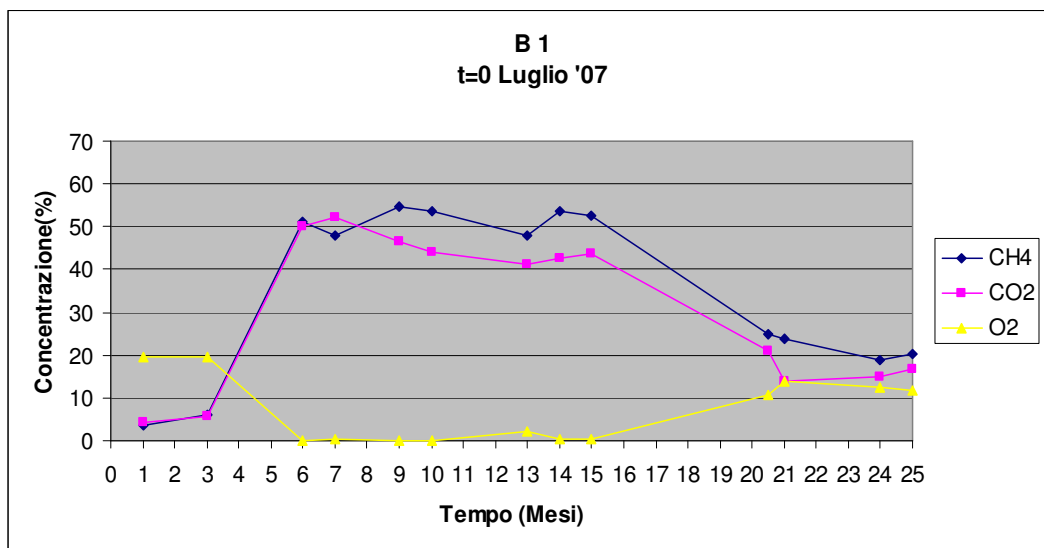


Figura 6. 12: Andamento delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 , O_2 nel biofiltro B1

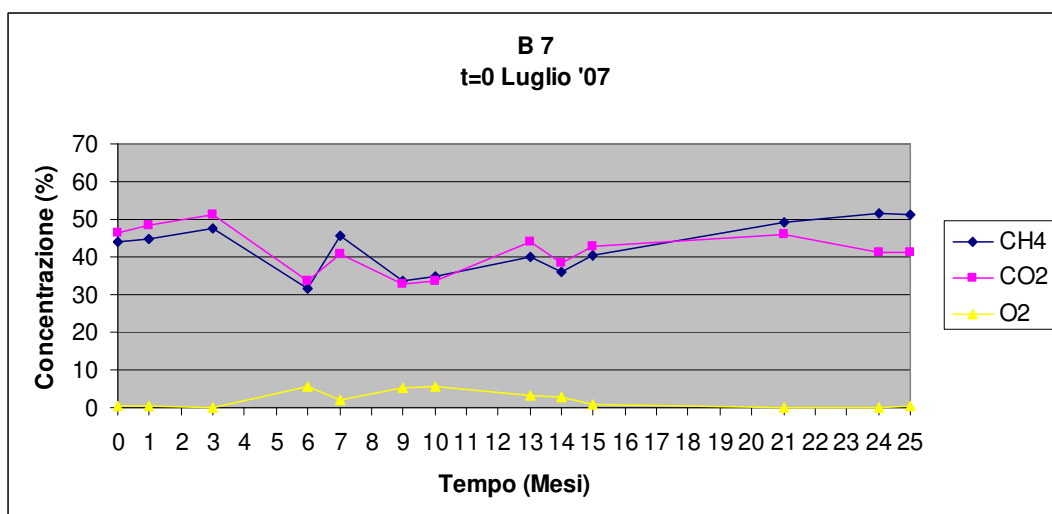


Figura 6. 13: Andamento delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 , O_2 nel biofiltro B7

6. I risultati del monitoraggio

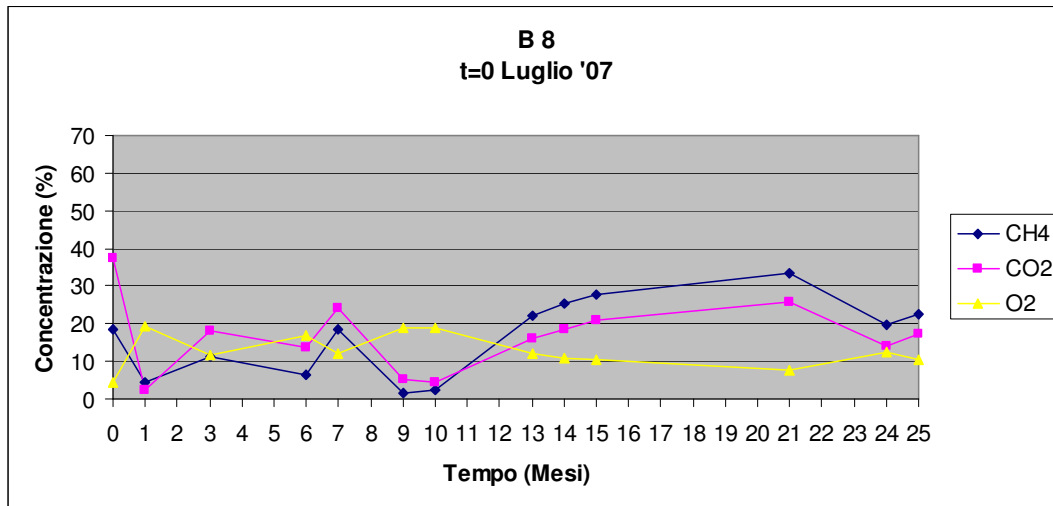


Figura 6. 14: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B8

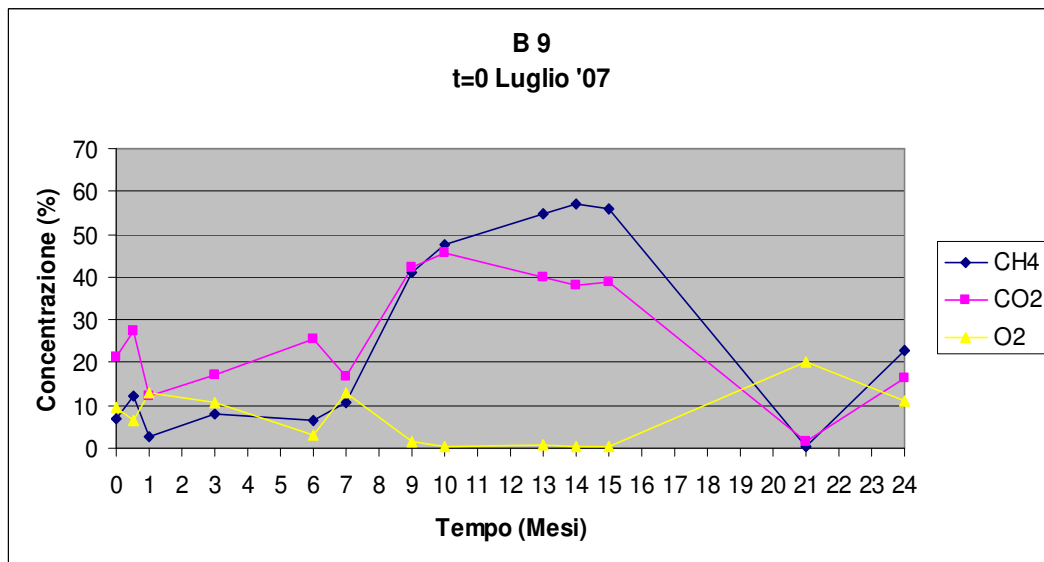


Figura 6. 15: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B9

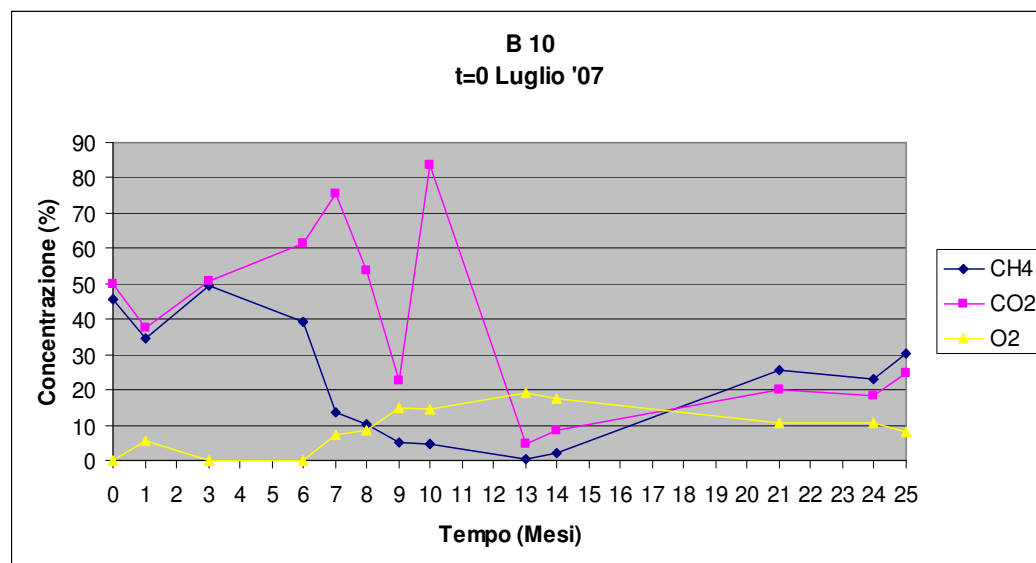


Figura 6. 16: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B10

6. I risultati del monitoraggio

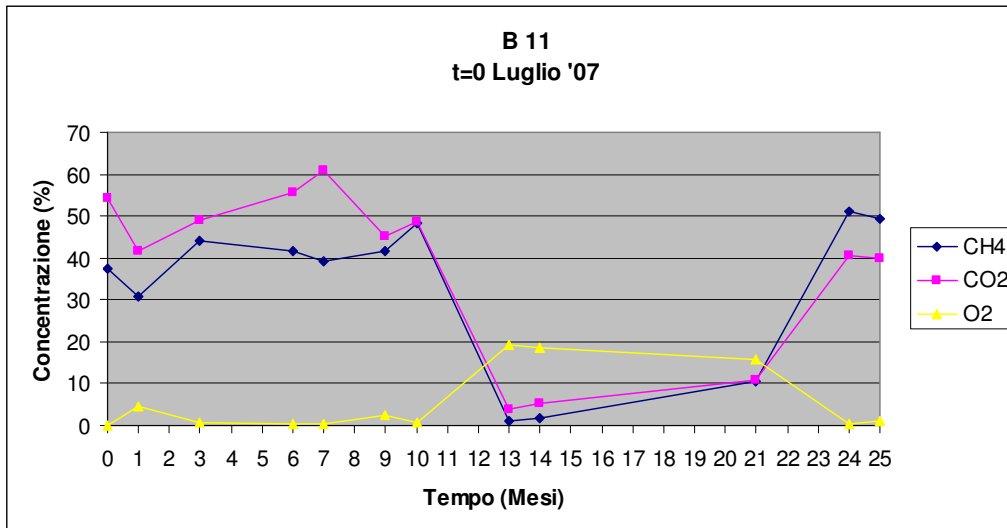


Figura 6. 17: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B11

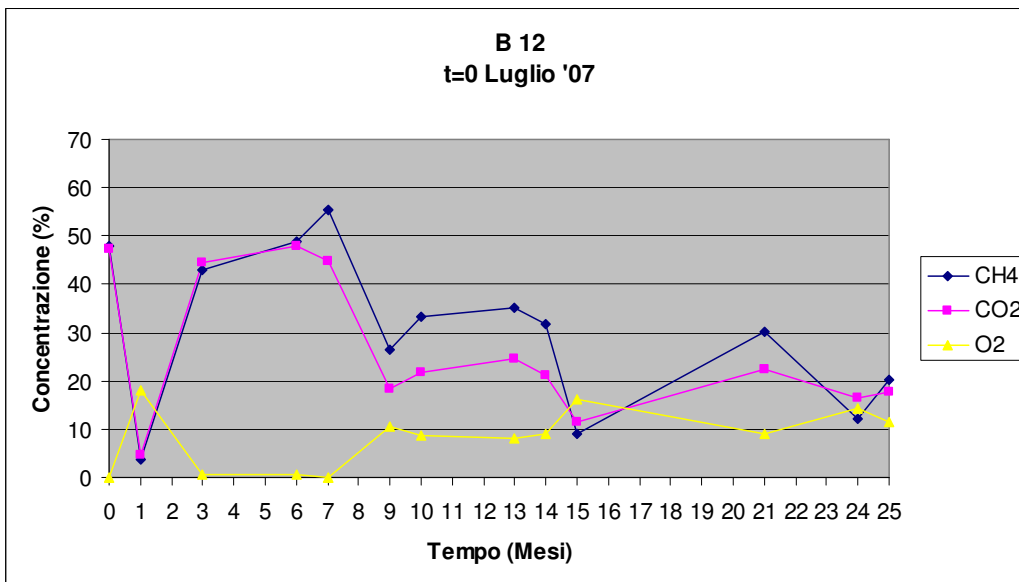


Figura 6. 18: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B12

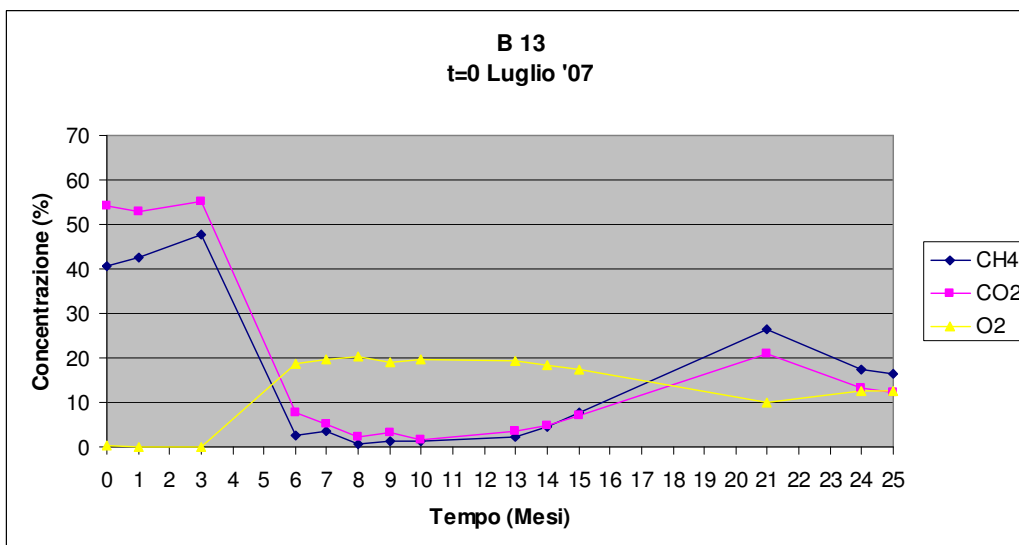


Figura 6. 19: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B13

6. I risultati del monitoraggio

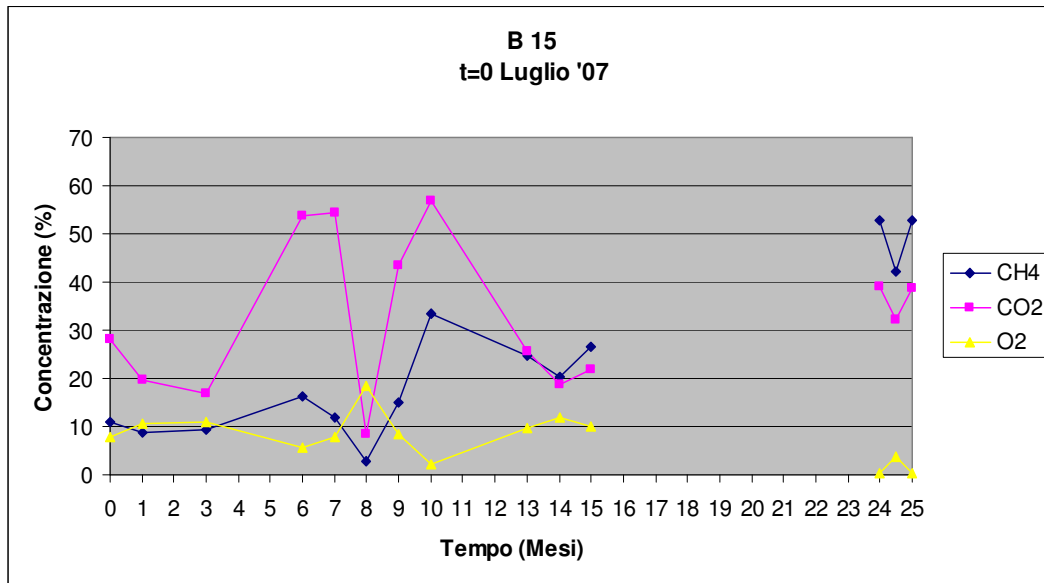


Figura 6. 20: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B15

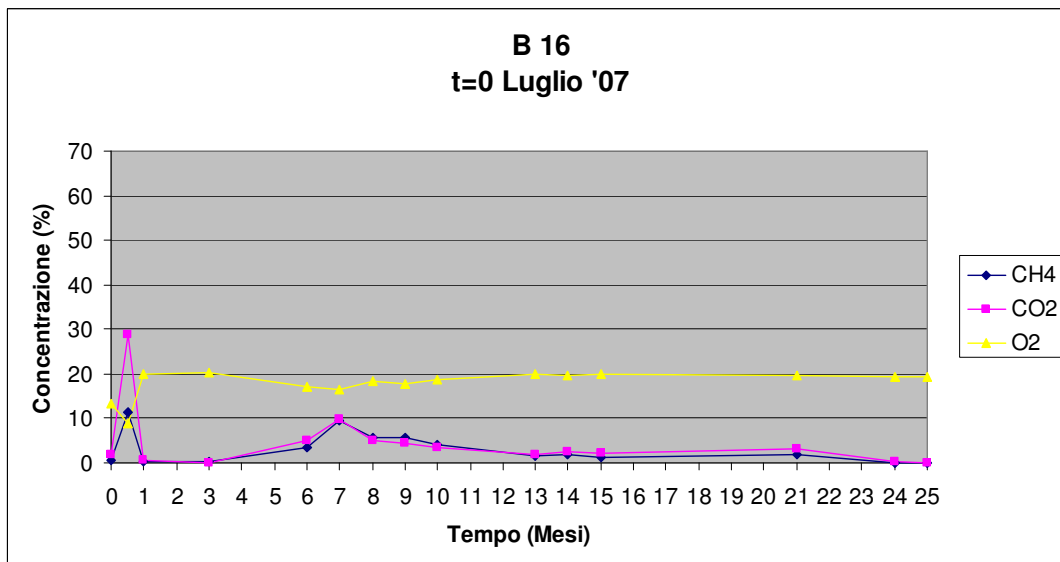


Figura 6. 21: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B16

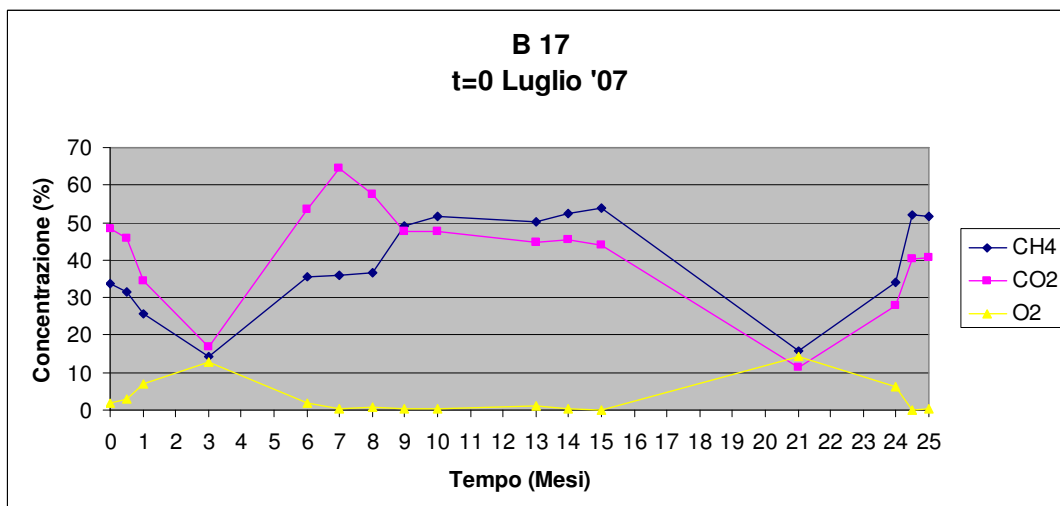


Figura 6. 22: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B17

6. I risultati del monitoraggio

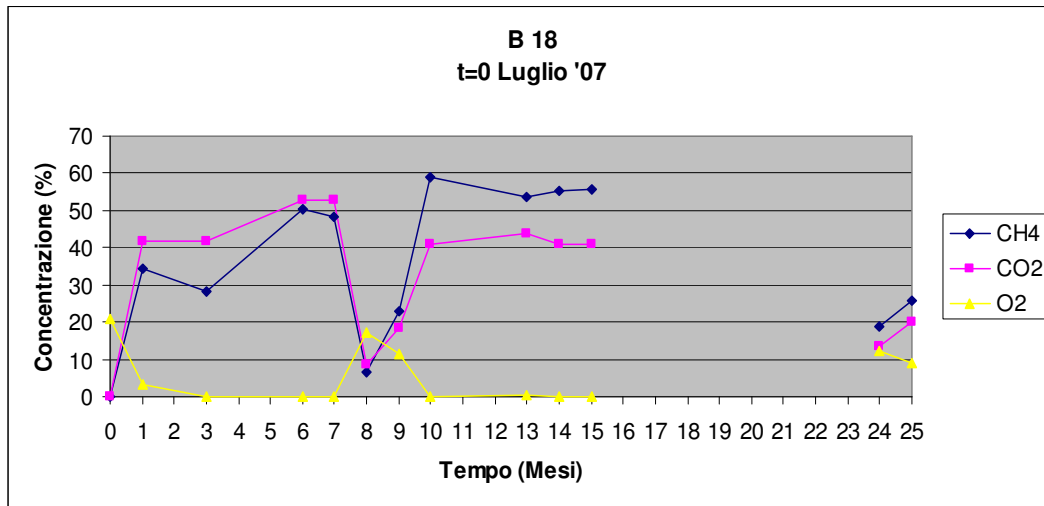


Figura 6. 23: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B18

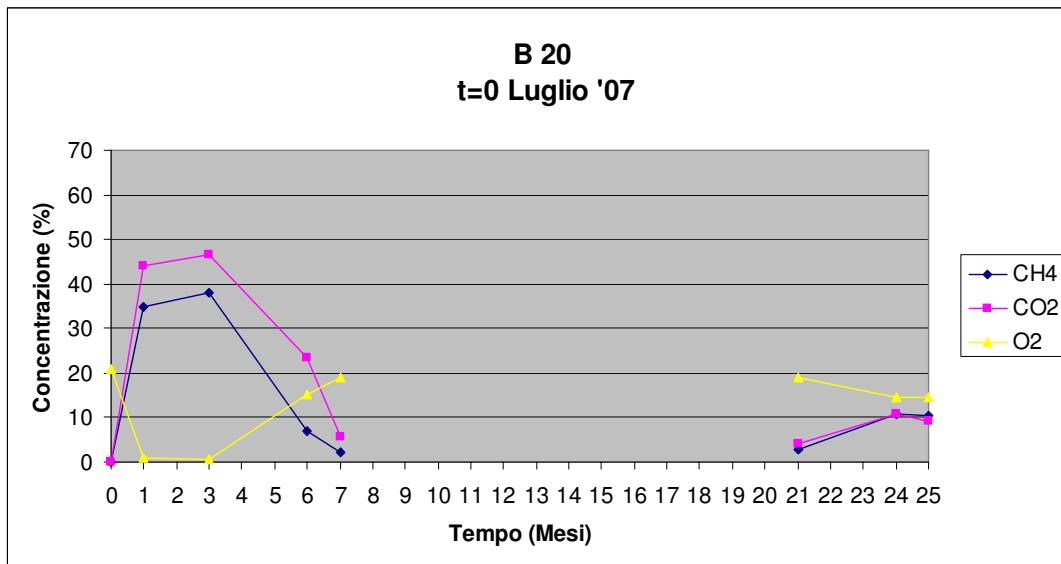


Figura 6. 24: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B20

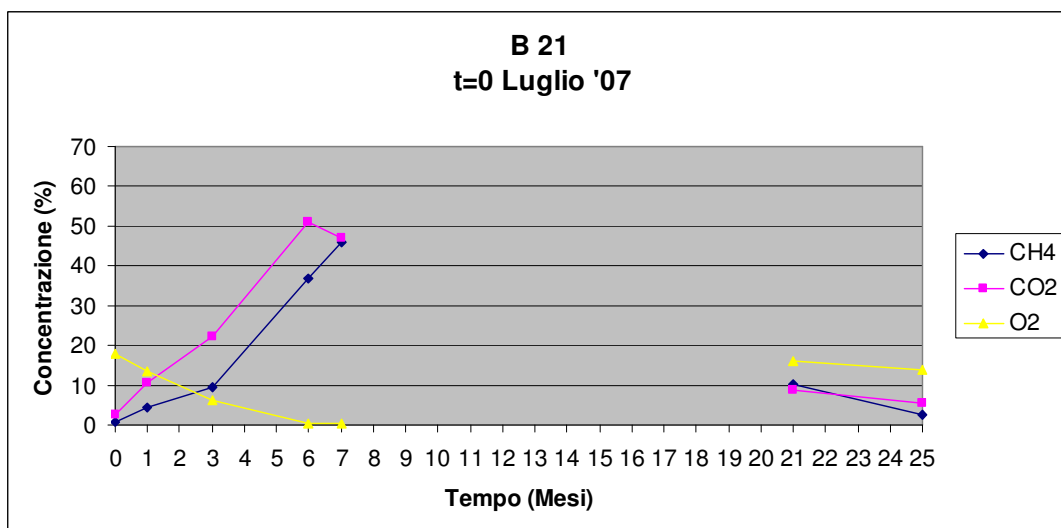


Figura 6. 25: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B21

6. I risultati del monitoraggio

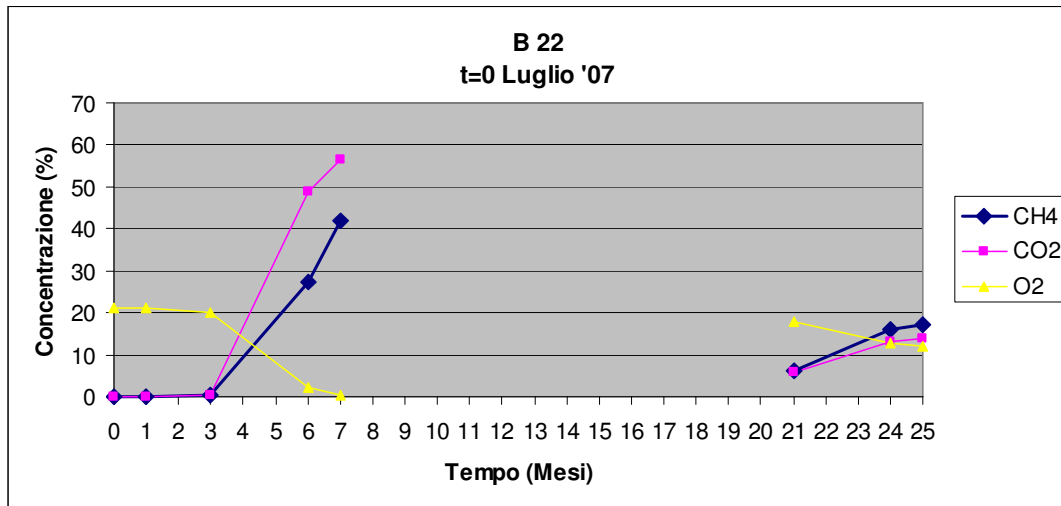


Figura 6. 26: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B22

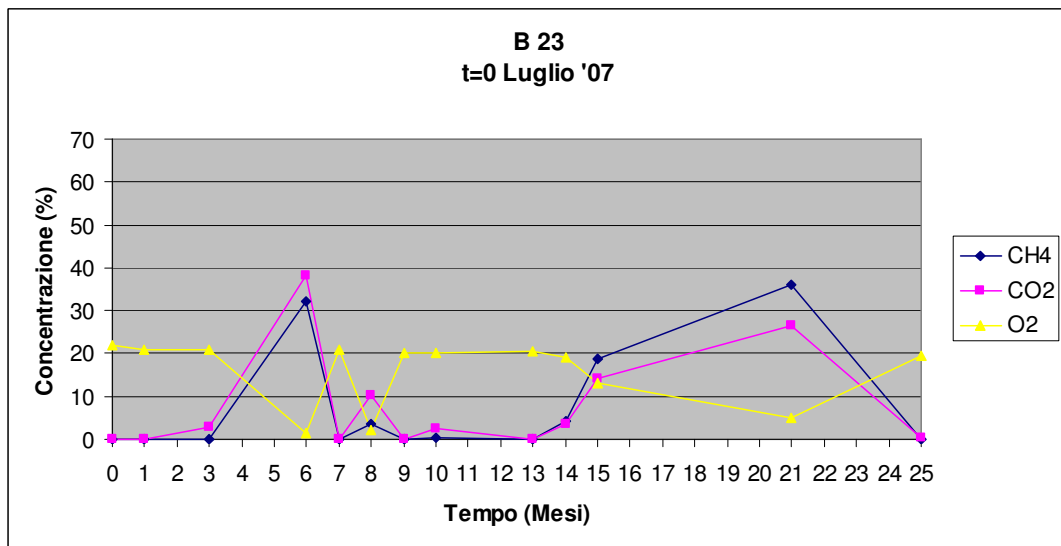


Figura 6. 27: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B23

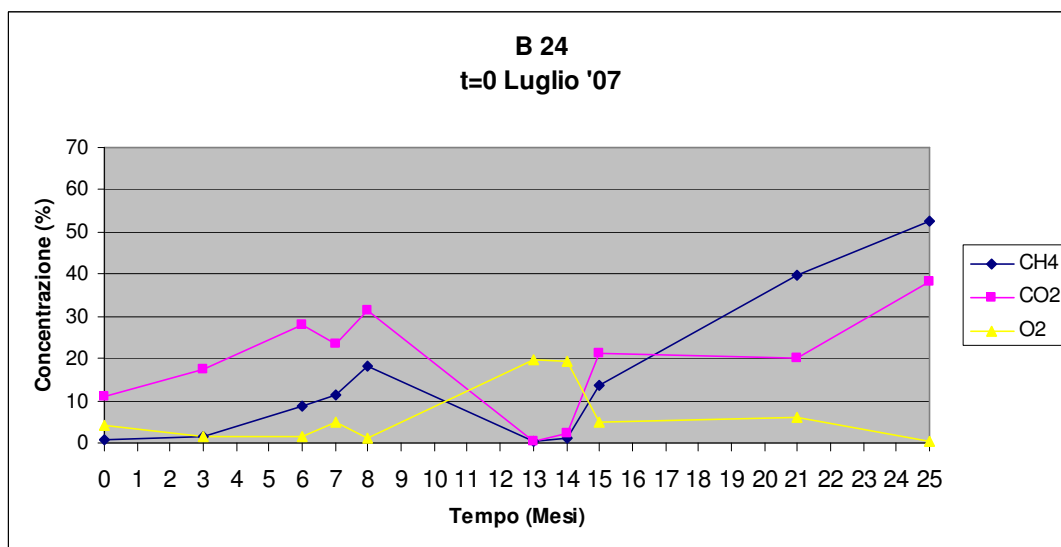


Figura 6. 28: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B24

6. I risultati del monitoraggio

Si riportano inoltre i risultati relativi alle misure della concentrazione del biogas sulla superficie dei biofiltri (figure 6.30-6.34):

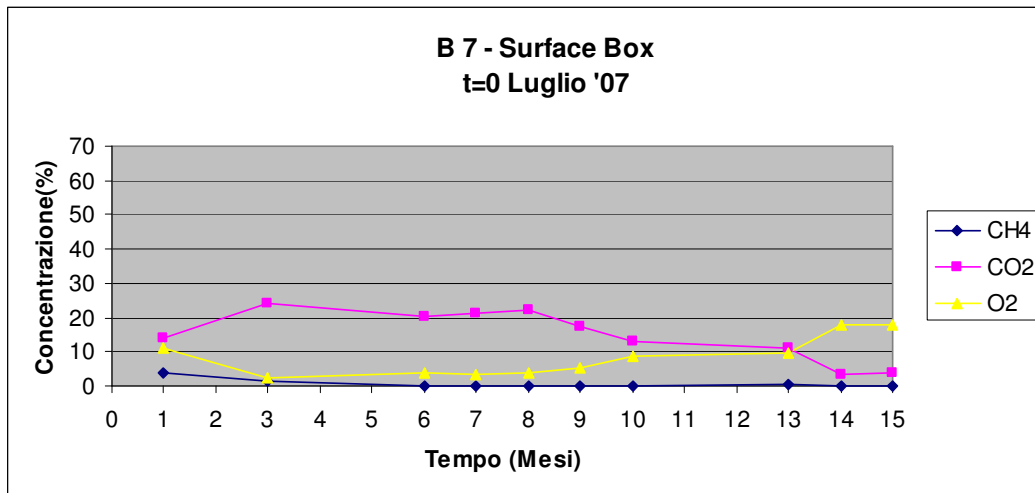


Figura 6. 29: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B7-surface box

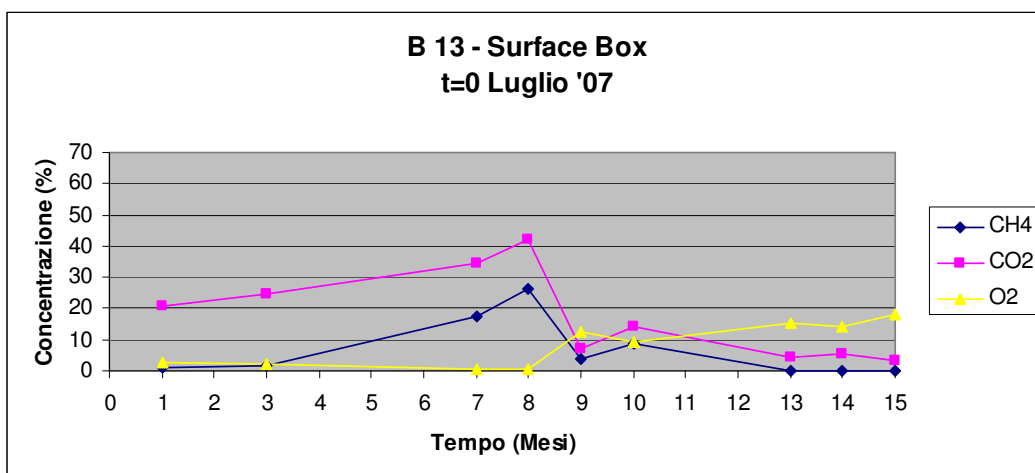


Figura 6. 30: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B13-surface box

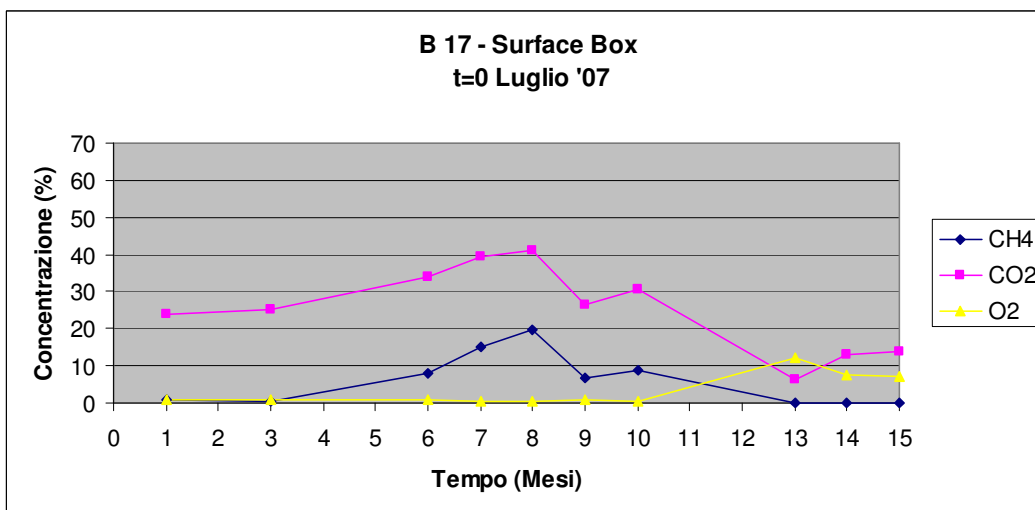


Figura 6. 31: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B17-surface box

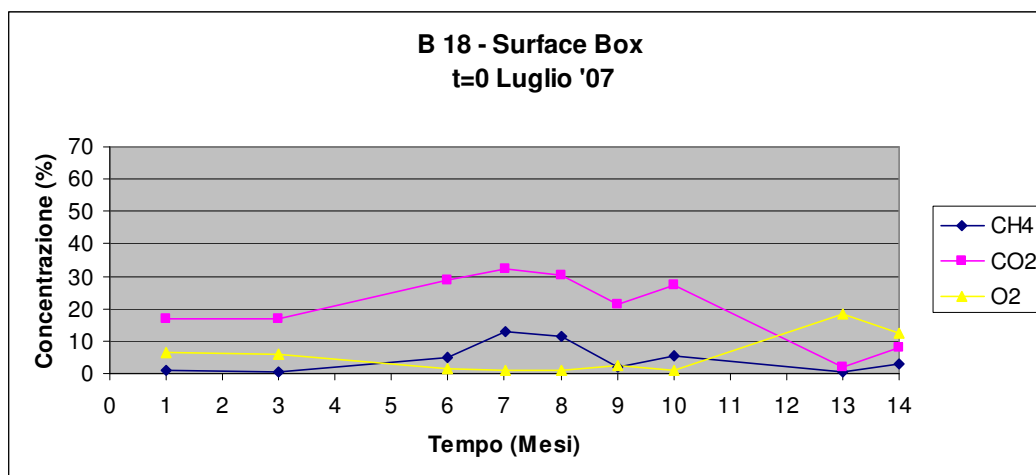


Figura 6. 32: Andamento delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ nel biofiltro B18-surface box

È possibile evidenziare come:

- B1, B9, B21, B22 hanno avuto bisogno di un certo tempo di carica (dell'ordine di qualche mese) per raggiungere livelli significativi di metano; gli altri biofiltri hanno espresso valori elevati di concentrazione, al loro fondo già dalle prime misure.
- Allo stato attuale si registra un accumulo di metano pari al 50% nei biofiltri B7, B11, B15, B17, B19, B24. Alcuni biofiltri, invece, sono a zero (B16), altri presentano un andamento altalenante B8, B9, B10, B12, B18, B23. Infine certi biofiltri mostrano un trend calante (B20, B21, B22, B23).
- Ci sono delle differenze sostanziali fra le misure effettuate sul fondo dei biofiltri e quelle in superficie, collegate al fenomeno della bioconversione microbico/enzimatica. A testimonianza di ciò, si osservi, per esempio, come B7 si caratterizza per una concentrazione di CH₄ pari a zero nei primi centimetri di compost (figura 6.30), pur presentando una concentrazione di metano del 50% a quota 6 m di profondità.
- Le “surface box” mostrano valori nulli, o comunque sotto al LEL per il CH₄; inoltre presentano dei rapporti CO₂/CH₄ sempre maggiori di 2 e talvolta molto alti.

6.2.2 Monitoraggio all'interno dei biofiltri M

Vengono riportati di seguito i risultati del monitoraggio di alcuni biofiltri M, a partire da settembre 2006 fino ad agosto 2009.

M 2			
Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Settembre '06 (1)	20,0	42,7	4,5
Settembre '06 (2)	18,8	41,1	2,7
Settembre '06 (3)	22,8	47,4	2,3
Settembre '06 (4)	13,7	39,6	4,7
Settembre '06 (5)	5,8	36,0	3,6
Ottobre '06 (1)	7,3	44,8	2,4
Ottobre '06 (2)	4,2	21,5	8,4
Novembre '06	3,3	16,9	10,2
Gennaio '07	2,1	14,2	11,4
Marzo '07	1,2	14,2	9,5
Maggio '07	2,0	4,7	16,4
Giugno '07	37,2	35,9	0,2
Luglio '09	2,2	8,6	10,8
Agosto '09	0,2	5,4	13,7

Tabella 6. 1: Risultato del monitoraggio nel biofiltro M2

M4			
Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Settembre '06 (1)	19,7	49,2	3,2
Settembre '06 (2)	39,6	59,1	0,0
Settembre '06 (3)	26,3	67,9	0,0
Ottobre '06	49,1	46,8	0,2
Novembre '06	53,3	46,9	0,0
Gennaio '07	32,9	19,8	9,9
Marzo '07	55,7	42,0	0,0
Maggio '07	59,2	39,2	0,2
Giugno '07	54,0	36,0	0,1
Luglio '09	46,3	42,0	0,3
Agosto '09	44,0	41,8	1,0

Tabella 6. 2: Risultato del monitoraggio nel biofiltro M4

M 7

Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Ottobre '06	7,8	22,1	9,9
Novembre '06 (1)	2,8	7,3	17,7
Novembre '06 (2)	6,9	16,4	13
Gennaio '07	9,3	22,3	9
Aprile '07	0,8	1,5	19,6
Giugno '07	27,9	26,2	3,7
Luglio '09	0	7,1	11,7
Agosto '09	0	4	15,2

Tabella 6. 3: Risultato del monitoraggio nel biofiltro M7

M 8			
Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Ottobre '06	32,9	54,2	0,0
Novembre '06	33,8	51,1	0,0
Gennaio '07	30,1	46,2	0,0
Marzo '07	13,3	35,4	2,3
Maggio '07	25,8	41,1	0,5
Giugno '07	35,0	38,0	0,2
Luglio '09	4,4	6,3	15,0
Agosto '09	3,2	6,4	13,9

Tabella 6. 4: Risultato del monitoraggio nel biofiltro M8

M 10

Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Ottobre '06	42,3	51,7	0,0
Novembre '06 (1)	42,7	52,1	0,0
Novembre '06 (2)	44,1	50,2	0,0
Novembre '06 (3)	44,1	50,2	0,0
Gennaio '07	47,9	47,8	0,0
Marzo '07 a	30,8	40,8	2,5
Marzo '07 b	30,8	40,8	2,5
Aprile '07	7,9	6,4	15,7
Giugno '07 (1)	48,9	37,7	0,7
Giugno '07 (2)	29,2	22,2	8,8
Luglio '09	8,6	23,6	4,4
Agosto '09	8,4	26,3	2,5

Tabella 6. 5: Risultato del monitoraggio nel biofiltro M10

Solo nel caso del biofiltro M4 permangono alte concentrazioni di CH₄ ed un rapporto CH₄/CO₂ maggiore di uno; gli altri biofiltri hanno mostrato un abbassamento drastico, spesso sotto al LEL, dei valori di concentrazione di metano, e mostrano un rapporto CH₄/CO₂ da 0,5 a 0,1, ovvero si riscontra una elevata conversione a CO₂ anche all'interno del biofiltro e non solo in superficie, come nel caso precedente delle "surface box".

6.3 Discussione dei risultati

Allo stato attuale di valutazione, analizzando i dati raccolti nella campagna di monitoraggio, si riscontra come 15 piezometri su 21 (totale dei 5 piezometri dell'intervento pilota e dei 16 dell'intervento sperimentale), ossia circa il 71%, presentano una concentrazione di CH₄ al di sotto del LEL. In particolare:

- alcuni di essi hanno mantenuto un valore (%) di metano nullo per tutta la durata della sperimentazione (G2, G4, G15);
- altri hanno immediatamente mostrato una rapida risposta all'intervento di risanamento, fino ad arrivare a valori di concentrazione di CH₄ al di sotto del LEL (C5), nei primi mesi di monitoraggio;

- altri ancora risultano fortemente interessati dall'intervento, presentando un andamento altalenante ed una progressiva e/o drastica riduzione della concentrazione di CH₄ nel tempo, con punte al di sotto del LEL o arrivando a stabilizzarsi intorno a valori pressochè nulli (C2, C4, G1, G3, G6, G11, G12, G13).

Pertanto, sulla base dei risultati a disposizione, l'intervento fisico-meccanico e biologico attuato nell'area di ex-cava risulta una strada interessante per ridurre la produzione di biogas, contenerne le migrazioni dalle sacche già esistenti e realizzare condizioni di compresenza di zone aerobiche ed anaerobiche. Ciò è testimoniato da:

- la presenza di una terza fase nel grafico dell'andamento delle concentrazioni medie nel tempo dei 21 piezometri, in cui si assiste ad un'ulteriore riduzione delle concentrazioni di metano ed anidride carbonica (rispetto alla drastica riduzione iniziale) e soprattutto ad un'inversione tra ossigeno e metano/anidride carbonica (l'ossigeno ha una concentrazione superiore a metano e anidride carbonica);
- la riduzione del BMP (*Potenziale Biochimico di Metanazione*) (Grilli *et al.*, 2008);
- la registrazione di picchi relativi alla concentrazione di CO₂, in concomitanza con punti di minimo della concentrazione di O₂ (per esempio nel piezometro C3).

Inoltre, concentrazioni rilevate di metano molto basse in molti punti interni dell'area di ex-cava, sono congruenti con i valori, spesso significativi, delle concentrazioni di metano registrate nei biofiltri. Infatti è opportuno segnalare come i biofiltri costituiscano, da progetto, un punto di raccolta/accumulo e di "concentrazione" della fase gassosa; pertanto si sono create delle vie preferenziali di convogliamento del metano verso queste zone a pressione litostatica minore (si ricorda infatti che la densità del compost *tailored* è circa la metà di quella del terreno). Il fatto che alcuni di essi presentano una concentrazione del 50% in metano conferma, quindi, il funzionamento della trincea biofiltro quale percorso preferenziale per la raccolta e l'accumulo controllato del biogas stesso. Posizionando opportunamente alcuni punti superficiali di monitoraggio del biogas ("surface box"), è stato possibile riscontrare come il fenomeno di bioconversione microbica/enzimatica rimanga confinato all'interno della trincea stessa, pertanto

in superficie non è stata registrata la presenza di CH_4 (da cui il termine “accumulo controllato”). Ciò rappresenta quindi un’ulteriore validazione della tecnica sperimentale di bonifica adottata.

È opportuno poi riportare un’ulteriore osservazione, relativa al tempo di carica dei biofiltri: una prima ipotesi di lavoro si basa sulla constatazione che alcuni di essi sono stati costruiti in aree già raggiunte dal metano nella sua migrazione o in zone di produzione dello stesso; per cui al momento della loro realizzazione hanno immediatamente presentato elevati valori di biogas al loro fondo. In altri casi, invece (B1, B9, B21, B22) è stato necessario un tempo nell’ordine di qualche mese affinché si creassero quei percorsi preferenziali di convogliamento del biogas verso le suddette zone a densità minore.

Inoltre, già allo stato attuale di valutazione dei risultati del monitoraggio, alcuni biofiltri presentano valori di concentrazione di CH_4 al di sotto del LEL (B16, B21, B23).

Infine, in alcuni biofiltri interni, il rapporto CH_4/CO_2 risulta un parametro fondamentale ai fini di valutare l’efficacia del fenomeno di bioconversione: il fatto che nell’area di ex-cava sia presente una condizione prevalente di rapporto fra $\text{CH}_4/\text{CO}_2 < 1$ (e cioè sta avvenendo la trasformazione del metano di anidride carbonica ad opera dei microrganismi presenti nel compost) testimonia la validità dell’intervento di risanamento attuato, sia per quei punti in cui si è raggiunto l’obiettivo di una concentrazione di metano (%) nulla, sia per quelle zone in cui sono presenti concentrazioni di CH_4 al di sopra del LEL (M4 ed M10). In quest’ultimo caso, infatti, si registra una forte attività microbico/enzimatica, coerente con la tendenza del sito verso l’obiettivo del risanamento (concentrazione nulla del metano nell’area interessata dall’intervento sperimentale) ed il confinamento controllato del biogas in alcuni punti stabiliti da progetto in attesa di una bioconversione totale.

Conclusioni

Per concludere quanto è stato esposto nella presente Tesi, si vogliono evidenziare alcune peculiarità del caso studio presentato, al fine di mostrare gli aspetti innovativi e specifici che caratterizzano l'intervento di risanamento attuato nel Sito "fondo Colombarotto".

- In primo luogo si evidenzia come le analisi di letteratura scientifica e le ricerche sul web, condotte a seguito delle vicende verificatesi nell'area di ex-cava nel dicembre 2005, hanno riscontrato **casi di esplosioni causate da biogas soltanto per discariche e non per ripristini ambientali con fanghi di cartiera**; il caso studio affrontato, pertanto, risulta unico nel suo genere.
- In secondo luogo è interessante il fatto che, nonostante le indagini effettuate abbiano dimostrato che il ripristino ambientale era stato effettuato non correttamente in alcuni punti (miscelazioni con suolo non conforme), i campionamenti eseguiti per verificare se vi fossero dei superamenti delle concentrazioni massime sulle matrici acqua e suolo (ai fini di capire se si trattava di un Sito Inquinato, ai sensi del DM 471/99, "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni") non hanno riscontrato alcun superamento. Pertanto, non essendoci contaminazione delle matrici suolo e acqua, non si è ricaduti nell'ambito di applicazione del Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471, ossia **non si è ricaduti nell'ambito della normativa vigente**.

Anche questo aspetto conferma la peculiarità del caso studio affrontato, in quanto le indagini condotte per quei casi di migrazione di biogas da discariche, riportati a titolo esemplificativo nel capitolo 2 (avvenuti in diverse località della provincia di Torino) evidenziavano la presenza di un Sito Inquinato ai sensi del DM 471/99.

- Immediata conseguenza di quanto riportato sopra è che le indagini successive e gli interventi condotti ai fini del risanamento dell'area sono stati eseguiti ricorrendo a **procedure amministrative frutto di una valutazione sito-specifica e non di una procedura standardizzata**. In particolare, l'iter

amministrativo seguito si è basato sull'emissione di ordinanze e disposizioni dirigenziali specifiche per il caso affrontato ed emanate a seguito di specifici Incontri Tecnici tra le Autorità locali (Conferenze di Servizio con: Comune di Imola, AUSL di Imola – Dipartimenti di Sanità Pubblica, Sezione Provinciale ARPA di Bologna – Distretto Territoriale di Imola, di seguito denominata ARPA) ed il gestore dell'intervento di ripristino; inoltre esso si è caratterizzato per una successione di fasi diverse che hanno seguito l'evoluzione degli interventi di messa in sicurezza e di successivo risanamento (una volta raggiunto l'obiettivo di messa in sicurezza delle zone limitrofe all'area di ex-cava).

- Un'ulteriore peculiarità deriva dal fatto che le **condizioni locali sono diverse dalle bonifiche “convenzionali”**, sia perché il metano non è incluso nell'elenco dei contaminanti (DM n. 471/99 e D.lgs n. 152/2006), sia perché non si può esprimere l'efficacia del trattamento semplicemente come percentuale di riduzione rispetto alle condizioni iniziali. Infatti, col procedere del tempo, il metano si forma per via della degradazione anaerobica e la concentrazione presente è il risultato della differenza tra il metano prodotto e quello allontanato istante per istante.
- Tenendo conto di tutte le considerazioni sopra riportate, per quanto riguarda l'intervento di risanamento dell'area, a seguito di una valutazione dal punto di vista economico ed ambientale si è scelto un **trattamento fisico-meccanico e biologico** (appartenente alle tecniche combinate di bonifica *in situ*).

La sua peculiarità sta nell'**attenuazione naturale** (bioremediation) mediante il solo utilizzo di miscele enzimatiche di origine vegetale e di compost a minor densità/maggior porosità, opportunamente preparato per creare una discontinuità all'interno del volume da decontaminare ed una conseguente via preferenziale per il flusso del biogas, e mediante intervento umano solo nella fase di preparazione, senza richiedere l'uso né di acqua né di energia elettrica. Avendo tale tecnologia innovativa importanti vantaggi economico/ambientali, quali:

- minimizzazione dell'impatto acustico,
- minimizzazione delle emissioni in atmosfera,
- riduzione dell'impatto visivo al termine delle operazioni nel sito,
- mitigazione dell'effetto serra,

- riduzione dei costi di implementazione della tecnologia e gestionali,
- minimizzazione degli inconvenienti per gli abitanti,
- accelerato recupero del sito per l'agricoltura,

mediante essa si vogliono raggiungere gli obiettivi di:

- riduzione della formazione di metano, riducendo la potenzialità della produzione di metano dal fango,
 - riduzione della presenza di metano, con allontanamento del gas già formato e bioconversione dello stesso,
 - recupero del sito per uso agronomico.
- Ai fini di verificare il raggiungimento di tali obiettivi e di valutare la completezza dell'intervento attuato e l'eventuale necessità di integrazioni con la stessa tecnologia oppure con altre tecnologie, è stato condotto un regolare programma di **monitoraggio in corso d'opera** della concentrazione del **biogas** nel tempo all'interno dell'area di ex-cava, in parallelo alle varie fasi dell'intervento di messa in sicurezza e di risanamento dell'area.
Mediante l'analizzatore di gas portatile GA2000 PLUS, sono state misurate le concentrazioni di CH₄, CO₂ ed O₂ in 21 piezometri interni all'area e in 29 biofiltri, ai fini di verificare l'efficacia dell'intervento.
 - Dai dati del monitoraggio (condotto nei piezometri dell'intervento pilota da giugno 2006, nei piezometri dell'intervento sperimentale da ottobre 2006 e nei biofiltri da luglio 2007, fino ad agosto 2009) si ricava che:
 - allo stato attuale di valutazione, in **15 piezometri** la concentrazione di metano ha raggiunto valori nulli o **al di sotto del LEL (5%)**;
 - per quanto riguarda la concentrazione media del biogas nei 21 piezometri, si sta assistendo non solo ad una diminuzione della concentrazione del metano, ma soprattutto ad un' **inversione tra ossigeno e metano/anidride carbonica** (l'ossigeno ha una concentrazione superiore a metano e anidride carbonica), e quindi al raggiungimento di una compresenza fra zone in condizioni aerobiche e zone in condizioni anaerobiche;
 - le misure effettuate nei **biofiltri** confermano il loro ruolo previsto in fase progettuale, ossia quello di realizzare (nel loro fondo) un'efficace

azione di bioconversione del metano e di costituire delle **zone di confinamento controllato del biogas**.

- Relativamente agli **sviluppi futuri**, il risanamento ed il monitoraggio sono tutt'ora in corso; una volta raggiunti gli obiettivi prefissati, sono previsti 12 mesi di **monitoraggio post-intervento**, per valutarne la stabilità.

In conclusione, gli studi condotti hanno permesso di confermare la validità e l'efficacia dell'intervento di risanamento realizzato nel "Fondo Colombarotto", mostrando come la miscelazione del fango di cartiera con compost "*tailored*" e miscele enzimatiche di origine vegetale risulti una strada interessante per ridurre la produzione di biogas a partire dalla degradazione della fase solida, per contenere le migrazioni dalle sacche già esistenti e per recuperare ad uso agricolo l'area interessata dall'intervento.

Inoltre, la realizzazione di un programma di monitoraggio regolare, quale parte integrante dell'intervento di risanamento nel sito, risulta uno strumento di lavoro efficace per l'ottimizzazione dell'intervento stesso.

Pertanto, al momento, la metodologia adottata da AMEK S.c.r.l risulta non solo estremamente interessante ma anche molto promettente per la bonifica di questo settore, anche in tempi assai contenuti, e può rappresentare una tecnica di bonifica e recupero applicabile anche ad altre aree che presentino situazioni simili di produzione non controllata di biogas in siti ed aree di deposito dei rifiuti.

.

Appendice I

Decreto Legislativo n. 22, 5 Febbraio 1997, Decreto Ronchi

“Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/61/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio (G.U. n. 38 del 15 febbraio 1997, Supplemento ordinario n. 33).

Articolo 17 *(Bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati da rifiuti)*

1. *Entro tre mesi dalla data di entrata in vigore del presente decreto il Ministro dell'ambiente, avvalendosi dell'Agenzia nazionale per la protezione dell'ambiente (ANPA), di concerto con i Ministri dell'industria, del commercio e dell'artigianato e della sanità, sentita la Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le Regioni e le Province autonome di Trento e Bolzano, definisce:*

a) i limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli, delle acque superficiali e delle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti;

b) le procedure di riferimento per il prelievo e l'analisi dei campioni;

c) i criteri generali per la messa in sicurezza, la bonifica del ripristino ambientale dei siti inquinati, nonché per la redazione dei progetti di bonifica.

c-bis) tutte le operazioni di bonifica di suoli e falde acquifere che facciano ricorso a batteri, a ceppi batterici mutanti, a stimolanti di batteri naturalmente presenti nel suolo al fine di evitare i rischi di contaminazione del suolo e delle falde acquifere.

1 bis. *I censimenti di cui al decreto del Ministro dell'ambiente 16 maggio 1989, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 121 del 26 maggio 1989, sono estesi alle aree interne ai luoghi di produzione, raccolta, smaltimento e recupero dei rifiuti, in particolare agli impianti a rischio di incidente rilevante di cui al decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988, n. 175, e successive modificazioni. Il Ministro dell'ambiente dispone, eventualmente attraverso accordi di programma con gli enti provvisti delle tecnologie di rilevazione più avanzate, la mappatura nazionale dei siti oggetto dei censimenti e la loro verifica con le regioni.*

2. *Chiunque cagiona, anche in maniera accidentale, il superamento dei limiti di cui al comma 1, lettera a), ovvero determina un pericolo concreto ed attuale di*

superamento dei limiti medesimi, è tenuto a procedere a proprie spese agli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale delle aree inquinate e degli impianti dai quali deriva il pericolo di inquinamento. A tal fine:

a) deve essere data, entro 48 ore, notifica al Comune, alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti, nonché agli organi di controllo sanitario e ambientale, della situazione di inquinamento ovvero del pericolo concreto ed attuale di inquinamento del sito;

b) entro le quarantotto ore successive alla notifica di cui alla lettera a), deve essere data comunicazione al Comune ed alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti degli interventi di messa in sicurezza adottati per non aggravare la situazione di inquinamento o di pericolo di inquinamento, contenere gli effetti e ridurre il rischio sanitario ed ambientale;

c) entro trenta giorni dall'evento che ha determinato l'inquinamento ovvero dalla individuazione della situazione di pericolo, deve essere presentato al Comune ed alla Regione il progetto di bonifica delle aree inquinate.

3. *I soggetti e gli organi pubblici che nell'esercizio delle proprie funzioni istituzionali individuano siti nei quali i livelli di inquinamento sono superiori ai limiti previsti, ne danno comunicazione al Comune, che diffida il responsabile dell'inquinamento a provvedere ai sensi del comma 2, nonché alla Provincia ed alla Regione.*

4. *Il Comune approva il progetto ed autorizza la realizzazione degli interventi previsti entro novanta giorni dalla data di presentazione del progetto medesimo e ne dà comunicazione alla Regione. L'autorizzazione indica le eventuali modifiche ed integrazioni del progetto presentato, ne fissa i tempi, anche intermedi, di esecuzione, e stabilisce le garanzie finanziarie che devono essere prestate a favore della Regione per la realizzazione e l'esercizio degli impianti previsti dal progetto di bonifica medesimo. Se l'intervento di bonifica e di messa in sicurezza riguarda un'area compresa nel territorio di più Comuni il progetto e gli interventi sono approvati ed autorizzati dalla Regione.*

5. *Entro sessanta giorni dalla data di presentazione del progetto di bonifica la Regione può richiedere al Comune che siano apportate modifiche ed integrazioni ovvero stabilite specifiche prescrizioni al progetto di bonifica.*

6. *Qualora la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici in vigore imponga il rispetto di limiti di accettabilità di contaminazione che non possono essere raggiunti neppure con l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, l'autorizzazione di cui al comma 4 può prescrivere l'adozione di misure di sicurezza volte ad impedire danni derivanti dall'inquinamento residuo, da attuarsi in via prioritaria con l'impiego di tecniche e di ingegneria ambientale, nonché limitazioni temporanee o permanenti all'utilizzo dell'area bonificata rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici vigenti, ovvero particolari modalità per l'utilizzo dell'area medesima. Tali prescrizioni comportano, ove occorra, variazione degli strumenti urbanistici e dei piani territoriali.*

6-bis. *Gli interventi di bonifica dei siti inquinati possono essere assistiti, sulla base di apposita disposizione legislativa di finanziamento, da contributo pubblico entro il limite massimo del 50 per cento delle relative spese qualora sussistano preminenti interessi pubblici connessi ad esigenze di tutela igienico - sanitaria e ambientale o occupazionali. Ai predetti contributi pubblici non si applicano le disposizioni di cui ai commi 10 e 11.*

7. *L'autorizzazione di cui al comma 4 costituisce variante urbanistica, comporta dichiarazione di pubblica utilità, di urgenza e di indifferibilità dei lavori, e sostituisce a tutti gli effetti le autorizzazioni, le concessioni, i concerti, le intese, i nulla osta, i pareri e gli assensi previsti dalla legislazione vigente per la realizzazione e l'esercizio degli impianti e delle attrezzature necessarie all'attuazione del progetto di bonifica.*

8. *Il completamento degli interventi previsti dai progetti di cui al comma 2, lettera c), è attestato da apposita certificazione rilasciata dalla Provincia competente per territorio.*

9. *Qualora i responsabili non provvedano ovvero non siano individuabili, gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale sono realizzati d'ufficio dal Comune territorialmente competente e ove questo non provveda dalla Regione, che si avvale anche di altri Enti pubblici. Al fine di anticipare le somme per i predetti interventi le Regioni possono istituire appositi fondi nell'ambito delle proprie disponibilità di bilancio.*

10. *Gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale nonché la realizzazione delle eventuali misure di sicurezza costituiscono onere reale sulle aree inquinate di cui ai commi 2 e 3. L'onere reale deve essere indicato nel certificato di destinazione urbanistica ai sensi e per gli effetti dell'articolo 18, comma 2, della legge 28 febbraio 1985, n. 47.*

11. *Le spese sostenute per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale delle aree inquinate nonché per la realizzazione delle eventuali misure di sicurezza, ai sensi dei commi 2 e 3, sono assistite da privilegio speciale immobiliare sulle aree medesime, ai sensi e per gli effetti dell'articolo 2748, secondo comma, del Codice civile. Detto privilegio si può esercitare anche in pregiudizio dei diritti acquistati dai terzi sull'immobile. Le predette spese sono altresì assistite da privilegio generale mobiliare.*

11-bis. *Nel caso in cui il sito inquinato sia soggetto a sequestro, l'autorità giudiziaria che lo ha disposto autorizza l'accesso al sito per l'esecuzione degli interventi di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale delle aree, anche al fine di impedire l'ulteriore propagazione degli inquinanti ed il conseguente peggioramento della situazione ambientale.*

12. *Le Regioni predispongono sulla base delle notifiche dei soggetti interessati ovvero degli accertamenti degli organi di controllo un'anagrafe dei siti da bonificare che individui:*

- a) gli ambiti interessati, la caratterizzazione ed il livello degli inquinanti presenti;*
- b) i soggetti cui compete l'intervento di bonifica;*
- c) gli Enti di cui la Regione intende avvalersi per l'esecuzione d'ufficio in caso di inadempienza dei soggetti obbligati;*
- d) la stima degli oneri finanziari.*

13. *Nel caso in cui il mutamento di destinazione d'uso di un'area comporti l'applicazione dei limiti di accettabilità di contaminazione più restrittivi, l'interessato deve procedere a proprie spese ai necessari interventi di bonifica sulla base di un apposito progetto che è approvato dal Comune ai sensi di cui ai commi 4 e 6. L'accertamento dell'avvenuta bonifica è effettuato dalla Provincia ai sensi del comma 8.*

13-bis. *Le procedure per gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale disciplinate dal presente articolo possono essere comunque utilizzate ad iniziativa degli interessati.*

13-ter. *Gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale previsti dal presente articolo vengono effettuati indipendentemente dalla tipologia, dalle dimensioni e dalle caratteristiche dei siti inquinati nonché dalla natura degli inquinamenti.*

14. *I progetti relativi ad intervento di bonifica di interesse nazionale sono presentati al ministero dell'ambiente ed approvati, ai sensi e per gli effetti delle disposizioni che precedono, con decreto del Ministro dell'ambiente di concerto con i Ministri dell'industria, del commercio e dell'artigianato e della sanità, d'intesa con la Regione territorialmente competente. L'approvazione produce gli effetti di cui al comma 7 e, con esclusione degli impianti di incenerimento e di recupero energetico, sostituisce, ove prevista per legge, la pronuncia di valutazione di impatto ambientale degli impianti da realizzare nel sito inquinato per gli interventi di bonifica.*

15. *I limiti, le procedure, i criteri generali di cui al comma 1 ed i progetti di cui al comma 14 relativi ad aree destinate alla produzione e all'allevamento sono definiti ed approvati di concerto con il ministero delle risorse agricole, alimentari e forestali.*

15-bis. *Il Ministro dell'ambiente, di concerto con il Ministro dell'università' e della ricerca scientifica e tecnologica e con il Ministro dell'industria, del commercio e dell'artigianato, emana un decreto recante indicazioni ed informazioni per le imprese industriali, consorzi di imprese, cooperative, consorzi tra imprese industriali ed artigiane che intendano accedere ad incentivi e finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie di bonifica previsti dalla vigente legislazione.*

15-ter. *Il Ministero dell'ambiente e le regioni rendono pubblica, rispettivamente, la lista di priorità nazionale e regionale dei siti contaminati da bonificare.*

Articolo 31 *(Determinazione delle attività e delle caratteristiche dei rifiuti per l'ammissione alle procedure semplificate)*

- 1.** *Le procedure semplificate devono comunque garantire un elevato livello di protezione ambientale e controlli efficaci.*
- 2.** *Con decreti del Ministro dell'ambiente, di concerto con i Ministri dell'industria, del commercio e dell'artigianato e della sanità, e, per i rifiuti agricoli e le attività che danno vita ai fertilizzanti, di concerto con il Ministro delle risorse agricole, alimentari e forestali, sono adottate per ciascun tipo di attività le norme, che fissano i tipi e le quantità di rifiuti, e le condizioni in base alle quali le attività di smaltimento di rifiuti non pericolosi effettuate dai produttori nei luoghi di produzione degli stessi e le attività di recupero di cui all'allegato C sono sottoposte alle procedure semplificate di cui agli articoli 32 e 33. Con la medesima procedura si provvede all'aggiornamento delle predette norme tecniche e condizioni.*
- 3.** *Le norme e le condizioni di cui al comma 2 sono individuate entro centottanta giorni dalla data di entrata in vigore del presente decreto e devono garantire che i tipi o le quantità di rifiuti ed i procedimenti e metodi di smaltimento o di recupero siano tali da non costituire un pericolo per la salute dell'uomo e da non recare pregiudizio all'ambiente. In particolare per accedere alle procedure semplificate le attività di trattamento termico e di recupero energetico devono, inoltre, rispettare le seguenti condizioni:*

 - a) siano utilizzati combustibili da rifiuti urbani oppure rifiuti speciali individuati per frazioni omogenee;*
 - b) i limiti di emissione non siano meno restrittivi di quelli stabiliti per gli impianti di incenerimento dei rifiuti dalle direttive comunitarie 89/369/CEE del Consiglio del 8 giugno 1989, 89/429/CEE del Consiglio del 21 giugno 1989, 94/67/CE del Consiglio del 16 dicembre 1994, e successive modifiche ed integrazioni, e dal decreto del Ministro dell'ambiente 16 gennaio 1995, pubblicato nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale 30 gennaio 1995, n. 24;*
 - c) sia garantita la produzione di una quota minima di trasformazione del potere calorifico dei rifiuti in energia utile calcolata su base annuale.*
- 4.** *La emanazione delle norme e delle condizioni di cui al comma 2 deve riguardare, in primo luogo, i rifiuti indicati nella lista verde di cui all'allegato II del regolamento CEE n. 259/93, e successive modifiche ed integrazioni.*

5. Per la tenuta dei registri di cui agli articoli 32, comma 3, e 33 comma 3, e l'effettuazione dei controlli periodici, l'interessato e' tenuto a versare alla provincia un diritto di iscrizione annuale determinato in relazione alla natura dell'attività' con decreto del Ministro dell'ambiente, di concerto con i Ministri dell'industria, del commercio e dell'artigianato e del Tesoro.

6. La costruzione di impianti che recuperano rifiuti nel rispetto delle condizioni, delle prescrizioni e delle norme tecniche di cui ai commi 2 e 3 è disciplinata dal d.P.R. 24 maggio 1988, n. 203, e dalle altre disposizioni che regolano la costruzione di impianti industriali. L'autorizzazione all'esercizio nei predetti impianti di operazioni di recupero di rifiuti non individuati ai sensi del presente articolo resta comunque sottoposta alle disposizioni di cui agli articoli 27 e 28.

7. Alle denunce e alle domande disciplinate dal presente Capo si applicano, in quanto compatibili, le disposizioni di cui al Decreto del Presidente della Repubblica 26 aprile 1992, n. 300, e successive modifiche ed integrazioni. Si applicano, altresì, le disposizioni di cui all'articolo 21 della legge 7 agosto 1990, n. 241.

Articolo 33 (Operazioni di recupero)

1. A condizione che siano rispettate le norme tecniche e le prescrizioni specifiche adottate ai sensi dei commi 1, 2 e 3 dell'articolo 31, l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti possono essere intraprese decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio di attività alla provincia territorialmente competente.

2. Le condizioni e le norme tecniche di cui al comma 1, in relazione a ciascun tipo di attività, prevedono in particolare:

a) per i rifiuti non pericolosi:

1. le quantità massime impiegabili;

2. la provenienza, i tipi e le caratteristiche dei rifiuti utilizzabili nonché le condizioni specifiche alle quali le attività medesime sono sottoposte alla disciplina prevista dal presente articolo;

3. le prescrizioni necessarie per assicurare che, in relazione ai tipi o alle quantità dei rifiuti ed ai metodi di recupero, i rifiuti stessi siano recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente;

b) per i rifiuti pericolosi:

- 1. le quantità massime impiegabili;*
- 2. provenienza, i tipi e caratteristiche dei rifiuti;*
- 3. le condizioni specifiche riferite ai valori limite di sostanze pericolose contenute nei rifiuti, ai valori limite di emissione per ogni tipo di rifiuto ed al tipo di attività e di impianto utilizzato, anche in relazione alle altre emissioni presenti in sito;*
- 4. altri requisiti necessari per effettuare forme diverse di recupero;*
- 5. le prescrizioni necessarie per assicurare che, in relazione al tipo ed alle quantità di sostanze pericolose contenute nei rifiuti ed ai metodi di recupero, i rifiuti stessi siano recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti e metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente.*

3. La provincia iscrive in un apposito registro le imprese che effettuano la comunicazione di inizio di attività ed entro il termine di cui al comma 1 verifica d'ufficio la sussistenza dei presupposti e dei requisiti richiesti. A tal fine alla comunicazione di inizio di attività e' allegata una relazione dalla quale deve risultare:

- a) il rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche di cui al comma 1;*
- b) il possesso dei requisiti soggettivi richiesti per la gestione dei rifiuti;*
- c) le attività di recupero che si intendono svolgere;*
- d) stabilimento, capacità di recupero e ciclo di trattamento o di combustione nel quale i rifiuti stessi sono destinati ad essere recuperati;*
- e) le caratteristiche merceologiche dei prodotti derivanti dai cicli di recupero.*

Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998

“Individuazione rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli art. 31 e 33 del D.Lgs. 5 Febbraio 1997, n°22” (SOGU n°88 del 16/04/98).

Articolo 1 (Principi generali)

1. Le attività, i procedimenti ed i metodi di recupero di ciascuna delle tipologie di rifiuti individuati dal presente decreto non devono costituire un pericolo per la salute dell'uomo e recare pregiudizio all'ambiente, ed in particolare non devono:

- a) creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora;*

- b) causare inconvenienti da rumori e odori;*
- c) danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse;*

2. *Negli allegati 1, 2 e 3 sono definite le norme tecniche generali che, ai fini del comma 1, individuano i tipi di rifiuto non pericolosi e fissano, per ciascun tipo di rifiuto e per ogni attività e metodo di recupero degli stessi, le condizioni specifiche in base alle quali l'esercizio di tali attività è sottoposto alle procedure semplificate di cui all'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 e successive modifiche e integrazioni.*

3. *Le attività, i procedimenti e i metodi di recupero di ogni tipologia di rifiuto, disciplinati dal presente decreto, devono rispettare le norme vigenti in materia di tutela della salute dell'uomo e dell'ambiente, nonché di sicurezza sul lavoro; ed in particolare:*

- a) le acque di scarico risultanti dalle attività di recupero dei rifiuti disciplinate dal presente decreto devono rispettare le prescrizioni e i valori limite previsti dal decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152, e successive modificazioni;*
- b) le emissioni in atmosfera risultanti dalle attività di recupero disciplinate dal presente decreto devono, per quanto non previsto dal decreto medesimo, essere conformi alle disposizioni di cui al decreto del Presidente della Repubblica 24 maggio 1988, n. 203, e successive modifiche e integrazioni.*

4. *Le procedure semplificate disciplinate dal presente decreto si applicano esclusivamente alle operazioni di recupero specificate ed ai rifiuti individuati dai rispettivi codici e descritti negli allegati.*

Articolo 5 (Recupero ambientale)

1. *Le attività di recupero ambientale individuate nell'allegato 1 consistono nella restituzione di aree degradate ad usi produttivi o sociali attraverso rimodellamenti morfologici.*

2. *L'utilizzo dei rifiuti nelle attività di recupero di cui al comma 1 è sottoposto alle procedure semplificate previste dall'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997 n. 22, a condizione che:*

- a) i rifiuti non siano pericolosi;*
- b) sia previsto e disciplinato da apposito progetto approvato dall'autorità competente;*

c) sia effettuato nel rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche previste dal presente decreto

per la singola tipologia di rifiuto impiegato, nonché nel rispetto del progetto di cui alla lettera b);

d) sia compatibile con le caratteristiche chimico-fisiche, idrogeologiche e geomorfologiche dell'area da recuperare.

d-bis) in ogni caso, il contenuto dei contaminanti sia conforme a quanto previsto dalla legislazione vigente in materia di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, in funzione della specifica destinazione d'uso del sito.

Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999, n. 471

“Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 e successive modificazioni ed integrazioni” (SOGU n°293 del 15/12/99).

Articolo 1 (Campo di applicazione)

1. *Il presente regolamento stabilisce i criteri, le procedure e le modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni. A tal fine disciplina:*

a- i limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli, delle acque superficiali e delle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti;

b- le procedure di riferimento per il prelievo e l'analisi dei campioni;

c- i criteri generali per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, nonché per la redazione dei relativi progetti;

d- i criteri per le operazioni di bonifica di suoli e falde acquifere che facciano ricorso a batteri, a ceppi batterici mutanti, a stimolanti di batteri naturalmente presenti nel suolo;

e- il censimento dei siti potenzialmente inquinati, l'anagrafe dei siti da bonificare e gli interventi di bonifica e ripristino ambientale effettuati da parte della pubblica amministrazione;

f- i criteri per l'individuazione dei siti inquinati di interesse nazionale.

2. Le disposizioni del presente decreto non si applicano all'abbandono di rifiuti disciplinato dall'articolo 14, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni ed integrazioni. In ogni caso si dovrà procedere alla classificazione quantificazione ed indicazione della localizzazione nel sito dei rifiuti abbandonati o depositati in modo incontrollato, ai fini , degli eventuali interventi di bonifica e ripristino ambientale da effettuate ai sensi del presente decreto nel caso in cui, a seguito della rimozione, avvio a recupero e smaltimento dei suddetti rifiuti, si accerti il superamento o il pericolo concreto ed attuale di superamento dei valori di concentrazione limite accettabili di cui all'articolo 3, comma 1.

3. Le norme del presente decreto che disciplinano la competenza e la realizzazione degli interventi di messa in sicurezza d'emergenza non si applicano qualora la vigilanza ed il controllo sugli impianti produttivi e di gestione dei rifiuti nonché l'adozione delle misure necessarie per prevenire i rischi e limitare le conseguenze di incidenti a tutela dell'ambiente e della salute umana siano disciplinati da disposizioni speciali. In tali casi la bonifica ed il ripristino, ambientale dei siti restano comunque disciplinati dal presente decreto.

4. Le disposizioni del presente regolamento non si applicano, se non in quanto espressamente richiamate, agli interventi di bonifica disciplinati da leggi speciali

5. Gli interventi di bonifica e ripristino ambientale per le aree caratterizzate da inquinamento diffuso sono disciplinati dalla regione con appositi piani.

Articolo 2 (Definizioni)

Ai fini dell'applicazione del presente decreto si intende per:

*a - **Sito**: area o porzione di territorio, geograficamente definita e delimitata, intesa nelle diverse matrici ambientali e comprensiva delle eventuali strutture edilizie ed impiantistiche presenti;*

*b - **Sito Inquinato**: sito che presenta livelli di contaminazione o alterazioni chimiche, fisiche o biologiche del suolo o del sottosuolo o delle acque superficiali o delle acque sotterranee tali da determinare un pericolo per la salute pubblica o per l'ambiente naturale o costruito. Ai fini del presente decreto è inquinato il sito nel quale anche uno solo dei valori di concentrazione delle sostanze inquinanti nel suolo o nel sottosuolo o nelle acque sotterranee o nelle acque superficiali*

risulta superiore ai valori di concentrazione limite accettabili stabiliti dal presente regolamento;

*c - **Sito potenzialmente inquinato:** sito nel quale, a causa di specifiche attività antropiche pregresse o in atto, sussiste la possibilità che nel suolo o nel sottosuolo o nelle acque superficiali o nelle acque sotterranee siano presenti sostanze contaminanti in concentrazioni tali da determinare un pericolo per la salute pubblica o per l'ambiente naturale o costruito;*

*d - **Messa in sicurezza d'emergenza:** ogni intervento necessario ed urgente per rimuovere le fonti inquinanti, contenere la diffusione degli inquinanti e impedire il contatto con le fonti inquinanti presenti nel sito, in attesa degli interventi di bonifica e ripristino ambientale o degli interventi di messa in sicurezza permanente;*

*e - **Bonifica:** l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti presenti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque superficiali o nelle acque sotterranee ad un livello uguale o inferiore ai valori di concentrazione limite accettabili stabiliti dal presente regolamento;*

*f - **Bonifica con misure di sicurezza:** l'insieme degli interventi atti a ridurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque Sotterranee o nelle acque superficiali a valori di concentrazione superiori ai valori di concentrazione limite accettabili stabiliti per la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici, qualora i suddetti valori di concentrazione limite accettabili non possano essere raggiunti neppure con l'applicazione, secondo i principi della normativa comunitaria, delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili. In tali casi per l'uso del sito devono essere previste apposite misure di sicurezza, piani di monitoraggio e controllo ed eventuali limitazioni rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici. I valori di concentrazione residui di sostanze inquinanti devono comunque essere tali da garantire la tutela della salute pubblica la protezione dell'ambiente naturale o costruito*

*g - **Misure di sicurezza:** gli interventi gli specifici controlli necessari per impedire danni alla salute pubblica o all'ambiente derivanti dai livelli di concentrazione residui di inquinanti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque sotterranee e superficiali o dalla presenza di rifiuti staccati sottoposti ad interventi di messa in*

sicurezza permanente, nonché le azioni di monitoraggio idonee a garantire, in particolare, il controllo nel tempo dell'efficacia delle limitazioni d'uso, qualora, pur applicando, secondo i principi della normativa comunitaria, le misure tecnologie disponibili a costi sopportabili, la bonifica ed il ripristino ambientale non consentono di rispettare i valori di concentrazione limite accettabili stabiliti dal presente regolamento per la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici o non sia possibile rimuovere la fonte inquinante costituita dai rifiuti stoccati

*h - **Ripristino ambientale:** gli interventi di riqualificazione ambientale e paesaggistica, costituenti complemento degli Interventi di bonifica nei casi in cui sia richiesto, che consentono di recuperare il sito alla effettiva e definitiva, fruibilità per la destinazione d'uso conforme agli strumenti urbanistici in vigore, assicurando la salvaguardia della qualità delle matrici ambientali.*

*i - **Messa in sicurezza permanente:** insieme degli interventi atti a isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti qualora le fonti inquinanti siano costituite da rifiuti stoccati e noti sia possibile procedere alla rimozione degli stessi pur applicando le migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria. In tali casi devono essere previste apposite misure di sicurezza, piani di monitoraggio e controllo, ed eventuali limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici. I valori di concentrazione delle sostanze inquinanti nelle matrici ambientali influenzate dall'inquinamento derivante dai rifiuti stoccati non devono superare nel suolo, sottosuolo, acque sotterranee e acque superficiali i valori previsti nell'allegato 1;*

*j - **Inquinamento diffuso:** contaminazione o alterazioni chimiche, fisiche o biologiche del suolo o del sottosuolo o delle acque superficiali delle acque sotterranee imputabili alla collettività indifferenziata e determinate da fonti diffuse*

Articolo 6 *(Interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale)*

1. *Qualora la fonte inquinante sia costituita da rifiuti stoccati ed il progetto preliminare di cui all'articolo 10 dimostri che, nonostante l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria, non sia possibile la rimozione dei rifiuti stessi, il Comune*

o, se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, può autorizzare interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale, eventualmente prevedendo interventi di Ingegneria naturalistica.

2. Nei siti sottoposti ad interventi di messa in sicurezza permanente possono restare stoccati solo i rifiuti presenti nel sito stesso che costituiscono la fonte inquinante e i residui originati dal loro trattamento.

3. Ai siti sottoposti ad interventi di messa in sicurezza permanente si applicano le norme tecniche, finanziarie ed amministrative e le garanzie previste ai sensi del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni, per il controllo e la gestione delle discariche dopo la chiusura, fatto, comunque, salvo l'obbligo di procedere agli interventi di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale qualora si determinino situazioni di inquinamento o di pericolo concreto ed attuale di inquinamento.

4. Le misure di sicurezza e le limitazioni temporanee o permanenti o le particolari modalità previste per il riutilizzo dell'area devono risultare dal certificato di destinazione urbanistica di cui all'articolo 18, comma 2, della legge 28 febbraio 1985, n. 47, nonché dalla cartografia e dalle norme tecniche di attuazione dello strumento urbanistico generale del Comune ed essere comunicati all'Ufficio Tecnico Erariale competente.

5. Gli interventi di messa in sicurezza permanente devono privilegiare, ove possibile, il ricorso a tecnologie di trattamento di rifiuti e di riduzione del volume dei rifiuti stessi al fine di limitare la superficie e il volume complessivi del Sito interessato da tali interventi.

6. E' fatto comunque salvo l'obbligo di procedere alla bonifica ai sensi degli articoli 4 e 5 dell'area influenzata dalla fonte inquinante costituita dai rifiuti stoccati qualora i valori di concentrazione nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque sotterranee o nelle acque superficiali risultino superiori ai valori di concentrazione limite accettabili di cui all'articolo 3, comma 1.

Articolo 10 *(Approvazione del progetto ed autorizzazione degli interventi di bonifica, ripristino ambientale e di messa in sicurezza permanente)*

1. Fatto salvo quanto previsto dall'articolo 13, gli interventi di bonifica e ripristino ambientale e di messa in sicurezza permanente di cui agli articoli 4, 5 e

6 sono effettuati sulla base di apposita progettazione, da redigere sulla base dei criteri generali e linee guida previsti nell'allegato 4, che si articola nei seguenti tre livelli di approfondimenti tecnici progressivi: Piano della caratterizzazione, Progetto preliminare e Progetto definitivo. I criteri generali stabili nell'allegato 4 si applicano fino alla determinazione delle linee guida e dei criteri da parte della regione.

2. Entro trenta giorni l'evento che ha determinato il superamento dei valori di concentrazione limite accettabili o dalla individuazione della situazione di pericolo concreto ed attuale di superamento dei valori di concentrazione limite accettabili o dalla notifica dell'ordinanza di cui all'articolo 8 o, fatto salvo quanto disposto dall'articolo 9, comma 3, dalla comunicazione effettuata dall'interessato o, qualora necessario, dalla conclusione degli interventi di cui all'articolo 1, commi 1,2 e 3, deve essere presentato al Comune ed alla Regione il Piano della caratterizzazione predisposto secondo i criteri definiti nell'allegato 4.

3. Il progetto definitivo deve essere presentato al Comune ed alla Regione entro e non oltre un anno dalla scadenza del termine di cui al comma 2 al Comune o, se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, approva il progetto definitivo, entro novanta giorni dalla presentazione, sentita una Conferenza di servizi convocata ai sensi dell'articolo 14 della legge 7 agosto 1990, n. 241 e successive modifiche ed integrazioni, alla quale sono chiamati a partecipare gli enti locali interessati, l'ARPA competente per territorio e tutte le altre amministrazioni competenti per le autorizzazioni, le concessioni, i concerti, le intese, i nulla osta, i pareri e gli altri atti d'assenso di cui al comma 10. Se il progetto prevede la realizzazione di opere sottoposte a procedura di valutazione di impatto ambientale ai sensi della normativa vigente, l'approvazione del progetto medesimo è subordinato acquisizione della relativa pronuncia di compatibilità da parte della Amministrazione competente. In tali casi i termini previsti dal presente decreto sono valutazione di impatto ambientale.

4. Il Comune o se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, sentita la Conferenza di servizi approva il progetto della caratterizzazione e ne autorizza l'esecuzione, eventualmente richiedendo integrazioni imponendo specifiche prescrizione.

5. Sulla base dei risultati dell'esecuzione del Piano della caratterizzazione deve essere predisposto e trasmesso al Comune ed alla Regione il progetto preliminare

redatto secondo le modalità definite nell'Allegato 4. Il Comune o se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, sentita la Conferenza di servizi, approva il progetto preliminare, con la perimetrazione definitiva dell'area influenzata dalla fonte inquinante eventualmente richiedendo integrazioni ed imponendo specifiche prescrizioni.

6. *Sulla base del progetto definitivo di bonifica e ripristino ambientale o di bonifica e ripristino ambientale con misure di sicurezza o di messa in sicurezza permanente che stabilisce le eventuali prescrizioni e limitazioni per l'uso del sito.*

7. *I progetti di bonifica e ripristino ambientale con misure di sicurezza di cui all'articolo 5 possono essere approvati solo se siano rispettate tutte le seguenti condizioni:*

a- il progetto preliminare dimostri che i valori di concentrazione limite accettabili di cui all'allegato 1 non possono essere raggiunti neppure con l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili;

b- i valori di concentrazione residui da raggiungere per lo specifico sito per la destinazione d'uso prevista garantiscono la tutela della salute e dell'ambiente influenzato dall'impatto del sito; questa condizione deve essere verificata sulla base di un'analisi del rischio condotto secondo i criteri indicati nell'Allegato 4;

c- il Progetto preliminare di bonifica e ripristino ambientale preveda e descriva le misure di sicurezza da adottare nel sito e nell'area circostante, i piani di monitoraggio ed i controlli da eseguire per valutare l'efficacia nel tempo degli Interventi di bonifica e delle misure di sicurezza adottate.

8. *I progetti di messa in sicurezza permanente possono essere approvati solo se ricorrono le condizioni di cui all'articolo 6.*

9. *Con il provvedimento di approvazione del Progetto definitivo sono autorizzati gli interventi necessari per l'attuazione del progetto stesso e sono stabiliti i relativi tempi d'esecuzione, sono indicate le eventuali prescrizioni per l'esecuzione dei lavori ed è fissata l'entità delle garanzie finanziarie in misura non inferiore al 20% del costo stimato dell'intervento che devono essere prestate a favore della Regione per la corretta esecuzione ed il completamento degli interventi medesimi. Il provvedimento è comunque comunicato alla Regione, alla Provincia ed al Comune interessati.*

10. *Ai fini solo della realizzazione e dell'esercizio degli impianti e delle attrezzature necessarie all'attuazione del progetto definitivo e per il tempo*

strettamente necessario all'autorizzazione medesima, l'autorizzazione di cui al comma 9 sostituisce a tutti gli effetti le autorizzazioni, le concessioni, i concerti, le intese, i nulla osta, i pareri e gli assensi previsti dalla legislazione vigente. L'autorizzazione costituisce, altresì variante urbanistica e comporta dichiarazione di pubblica utilità, di urgenza ed indifferibilità dei lavori qualora la realizzazione e l'esercizio dei suddetti impianti ed attrezzature rivesta carattere di pubblica utilità.

11. *Nel caso di bonifica e ripristino ambientale di siti interessati da attività produttive in esercizio, fatto salvo l'obbligo di garantire la tutela della salute pubblica e dell'ambiente, il Comune o, se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, in sede di approvazione del progetto assicura che i suddetti interventi siano articolati in modo tale da risultare compatibili con la prosecuzione delle attività.*

Articolo 11 *(Progettazione per fasi)*

1. *Qualora dal progetto preliminare risulti che la bonifica o la bonifica con misure di sicurezza presenti particolare complessità a causa della natura degli interventi o dell'estensione dell'area interessata dai medesimi, l'approvazione del progetto preliminare può consentire che, fermo restando l'obbligo di prestare la garanzia per l'intero intervento, il progetto definitivo di bonifica o di bonifica con misure di sicurezza sia articolato in fasi progettuali distinte per rendere possibile la valutazione dell'adozione di tecnologie innovative o la realizzazione degli interventi di singole aree.*

2. *Ogni fase progettuale dovrà contenere un dettagliato rapporto delle operazioni svolte e dei risultati ottenuti nella fase precedente secondo le indicazioni dell'Allegato 4 ed essere approvata tenendo conto dei risultati dell'attuazione delle fasi progettuali precedenti.*

3. *Nell'autorizzazione dovrà essere indicato il termine di presentazione del progetto di bonifica della fase successiva.*

Appendice II

Adsorbimento

Luogo della bonifica	In Situ
Matrice ambientale	Falda
Materiali utilizzati	Unità di adsorbimento
Funzionamento	<p>I meccanismi di adsorbimento sono suddivisi in:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adsorbimento fisico; - Chemiassorbimento; - Adsorbimento elettrostatico. <p>Nell'adsorbimento fisico le interazioni sono consentite dalle deboli forze molecolari, quali la forza di Van der Waals. In quello chimico, si realizza una reazione chimica con la formazione di un legame sulla superficie del solido utilizzato. L'adsorbimento elettrostatico coinvolge gli ioni attraverso la forza di Coulomb. L'adsorbente più comune utilizzato è un granulato di carbonio attivo. Altri adsorbenti naturali e sintetici sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allumina attivata; - Spugna del foraggio; - Lignina; - Argille; - Resine sintetiche. <p>Allumina attivata E' ottenuta trattando il minerale di alluminio in modo che diventi poroso ed altamente adsorbitivo. L'allumina attivata è in grado di rimuovere una gran varietà di agenti inquinanti, compreso fluoruro, arsenico e selenio. E' richiesta la pulizia periodica con un rigenerante quali l'allume o l'acido perché l'allumina rimanga efficace.</p> <p>Spugna del foraggio La spugna del foraggio è una spugna cellulosica che contiene un polimero contenente ammina ed in grado di adsorbire i metalli pesanti. I gruppi funzionali nel polimero (cioè ammina e gruppi carbossilici) hanno una elevata affinità con i metalli pesanti sia in stato cationico che anionico.</p> <p>Argilla della lignina Le argille della lignina sono usate per trattare i flussi delle acque reflue con contaminazione da metalli pesanti organici ed inorganici.</p> <p>Resine sintetiche Le resine sintetiche sono più costose del carbonio attivo, ma hanno una maggiore capacità di adsorbimento ed una maggiore selettività rispetto ad inquinanti non trattabili diversamente. Inoltre, le</p>

Appendice II

	resine tendono ad essere più resistenti all'abrasione di quanto non sia il carbonio attivato, aumentandone così il tempo di impiego.
Utilizzabilità	Con questo metodo è possibile rimuovere la maggior parte degli agenti inquinanti organici ed inorganici, sia da gas che da liquidi. L'allumina attivata può rimuovere fluoruro e metalli pesanti. La spugna di foraggio è specificatamente usata per rimuovere i metalli pesanti. Le argille della lignina sono usate per trattare la contaminazione da metalli pesanti organici, inorganici e per trattare le acque reflue. Le resine sintetiche sono adatte per trattare inquinanti termicamente instabili quali gli esplosivi, grazie al fatto che la rigenerazione delle resine non avviene per via termica.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Inquinanti solubili in acqua e piccole molecole non sono adsorbiti efficacemente; - Costi alti se usato come trattamento primario; - Non applicabile in caso di livelli elevati di sostanze oleose; - Non pratico dove il contenuto di inquinante è così elevato da richiedere la rigenerazione frequente dell'unità adsorbente.
Costi	Acqua di falda contaminata da metalli pesanti: trattamento con spugna di foraggio \$ 340 per 1.000 galloni (3.785,41 litri), ammettendo che non sia necessario né rigenerare né sostituire le spugne. I costi per altri processi dell'adsorbente non sono disponibili.
Efficacia	Questi metodi sono usati da molto tempo il che ha consentito un buon sviluppo di tutti gli aspetti del loro funzionamento. Si può concludere quindi che è una tecnologia ben collaudata e dalle buone prestazioni.

Attenuazione Naturale o Biorimediazione Intrinseca

Luogo della Bonifica	In Situ
Classe	Trasformazione
Materiali Utilizzati	Monitoraggio senza alcun intervento diretto
Matrice Ambientale	<ul style="list-style-type: none"> - Suolo saturo - Falda
Funzionamento	<p>L'attenuazione naturale non è una vera e propria tecnologia. Per prendere in considerazione questa opzione è necessario definire un accurato modello per la valutazione della concentrazione dell'agente inquinante, delle vie di propagazione e del tasso di degradazione. L'obiettivo primario del processo modellistico è di dimostrare che i processi naturali di degradazione dell'agente inquinante ne ridurranno le concentrazioni a livelli accettabili prima che raggiunga un bersaglio sensibile. A corredo del modello dovrà essere ovviamente condotto un monitoraggio accurato per appurare che la degradazione proceda secondo quanto previsto. In sintesi, l'attenuazione naturale è una opzione percorribile qualora nessuna altra tecnologia sia applicabile e presenta comunque discreti vantaggi rispetto alle altre metodologie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nessuna produzione di residui di trattamento; - Minore azione intrusiva; - Può essere utilizzata contemporaneamente ad altre tecniche; - Il costo è generalmente basso.
Determinazioni preliminari	<p>Il limite di degradazione dell'agente inquinante dipende da una varietà di parametri, quali i tipi e le concentrazioni dell'agente inquinante, temperatura, umidità e disponibilità di recettori di elettroni. Generalmente, i dati necessari sono i seguenti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dati di qualità dell'acqua, di falda e del terreno; - Distribuzione tridimensionale inquinante; - Dati storici di qualità dell'acqua che mostrano le variazioni delle concentrazioni dell'agente inquinante nel tempo; - Caratteristiche chimiche e fisiche degli agenti inquinanti; - Dati geochimici per valutare il potenziale di biodegradazione degli agenti inquinanti; - Posizione dei ricevitori potenziali.
Utilizzabilità	<ul style="list-style-type: none"> - Composti Organici Volatili (VOCs); - Composti Organici Semivolatili (SVOCs); - Idrocarburi; - Antiparassitari, anche se il processo può essere meno efficace e può essere applicabile solo ad alcuni di essi; - Alcuni metalli, soprattutto quando si verifica un

Appendice II

	cambiamento della valenza chimica che provochi l'immobilizzazione dell'inquinante.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Inquinanti non degradabili; - Presenza di inquinanti veicolabili verso altri comparti e dannosi per l'ambiente; - Necessità di chiudere le operazioni in tempi brevi; - Elevata necessità di dati ambientali per la realizzazione di un modello corretto; - I prodotti intermedi di degradazione possono essere più mobili e più tossici dell'agente inquinante originale; - Controllo di lungo termine e relativa lievitazione dei costi; - Le circostanze idrologiche e geochemiche favorevoli all'attenuazione naturale verosimilmente cambiano col tempo e ciò potrebbe provocare una rinnovata mobilità degli agenti inquinanti precedentemente stabilizzati; - Maggiore difficoltà di ottenere accettazione pubblica.
Costi	I costi ovviamente riguardano le operazioni di modellistica e di monitoraggio, per cui sono enormemente variabili da caso a caso.

Biodenitrificazione

Luogo della Bonifica	In Situ
Matrice Ambientale	Falda
Materiali Utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Serie di pozzi - Ammendanti non tossici
Funzionamento	Decontaminazione da nitrati di provenienza agricola, da reflui urbani e zootecnici e da inquinamento industriale. E' necessario aggiungere ammendanti, come acetato, attraverso pozzi di iniezione nell'area interessata. Gli ammendanti favoriscono la degradazione anaerobica per mezzo di batteri, che riducono i nitrati in azoto gassoso ed accelerano la dinamica del processo. In assenza di ossigeno, la popolazione microbica richiede una fonte di carbonio: in questo caso i nitrati si convertono in nitriti, mentre la respirazione anaerobica continua con la formazione di azoto gassoso.
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura; - pH; - Eh; - Conduttività; - Concentrazione di ossigeno disciolto iniziale; - Concentrazione di nitrati; - Concentrazione di nitriti.
Utilizzabilità	Nitrati
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Il diossido di carbonio, risultante dalla degradazione della fonte di carbonio, potrebbe incrementare i livelli di HCO_3^- nell'acquifero; - Con l'aumentare del tempo di applicazione si alterano le condizioni geochimiche della matrice: la concentrazione di ossigeno disciolto tende a diminuire ed il processo avviene in condizioni anaerobiche, per cui altri accettori di elettroni, oltre ai nitrati, possono essere MnO_2, FeO_3, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o SO_4.

Biofiltrazione

Luogo della bonifica	In Situ
Matrice ambientale	Atmosfera
Materiali utilizzati	Biofiltri
Funzionamento	La biofiltrazione è una tecnologia a basso costo ed altamente efficace per intervenire in caso di inquinamento atmosferico, in cui gli agenti inquinanti organici immersi in una fase di vapore vengono fatti passare attraverso mezzi porosi sui quali sono presenti microrganismi.
Utilizzabilità	Come con altri processi biologici di trattamento, la biofiltrazione dipende dalla biodegradabilità degli agenti inquinanti. Nelle circostanze adeguate, i biofiltri possono rimuovere virtualmente tutti gli agenti inquinanti. La biofiltrazione è usata soprattutto per trattare VOCs alogenati e non ed idrocarburi. Il sistema è utilizzato con successo per il controllo degli odori negli impianti di compostaggio.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Basse temperature possono ritardare o arrestare l'efficacia, quindi è richiesto un controllo delle temperature dei biofiltri; - Gli inquinanti recalcitranti alla degradazione non saranno ovviamente convertiti in prodotti inoffensivi.
Costi	Da \$ 5 a \$ 10 per chilogrammo di agente inquinante.
Efficacia	I biofiltri sono utilizzati con successo da più di 20 anni. Per una maggiore efficacia è necessario controllare i livelli dell'umidità, il pH, la temperatura del filtro. Inoltre, l'accumulo di biomassa può richiedere la pulizia meccanica periodica del filtro.

Biopile

Luogo della Bonifica	Ex Situ – On Site
Classe	Trasformazione
Matrice Ambientale	Suolo
Materiali Utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Superfici adeguate; - Tubi forati; - Materiali nutrienti; - Teli impermeabili; - Ammendanti.
Funzionamento	<p>Come il landfarming, con la differenza che si formano cumuli e non strati di terreno contaminato, separati da tubi forati attraverso i quali si introduce aria ed elementi nutrienti. L'area coinvolta è quindi minore e, qualora siano presenti sostanze volatili, la biopila può essere ricoperta con teli impermeabili. Attraverso opportuni fori si possono controllare e captare i gas prodotti: l'aerazione avviene per aspirazione per avere anche un controllo delle emissioni volatili. Il controllo dell'umidità può avvenire tramite l'immissione di aria satura di vapore d'acqua o impiegando un impianto di irrigazione. Possono essere distinte in pile semplici (Heap Pile) e pile a strati sovrapposti (Soil Heaping).</p>
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometria: grossi clasti limitano l'applicabilità; - Umidità: se troppo alta riduce la diffusione dell'ossigeno, se bassa riduce l'attività dei microrganismi; - Presenza di argilla: se troppo elevata, limita l'applicabilità; - pH: deve essere compreso tra 6,5 e 8,5; - Presenza di composti organici: se bassa, limita l'attività dei microrganismi, se alta viene favorita dagli idrocarburi come nutrimento; - Piovosità: se alta, è necessario predisporre gli opportuni drenaggi; - Temperatura dell'aria: se troppo alta, può inibire l'efficacia.
Utilizzabilità	<ul style="list-style-type: none"> - Composti organici volatili non alogenati; - Derivati del petrolio; - Composti organici volatili alogenati; - Composti organici semi-volatili alogenati; - Pesticidi.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Concentrazioni di inquinante troppo elevate; - Creazione di flussi d'aria preferenziali con la permanenza di aree non decontaminate.
Costi	Tra \$ 130 e \$ 260 per m ³

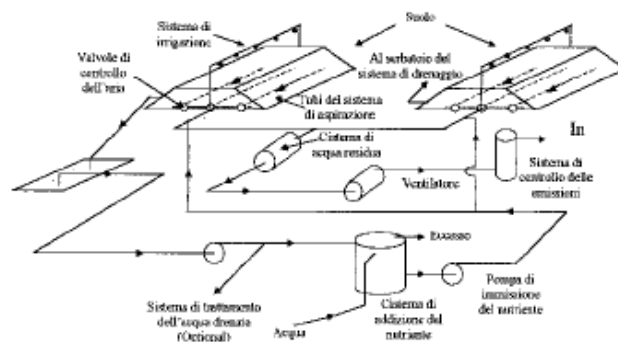
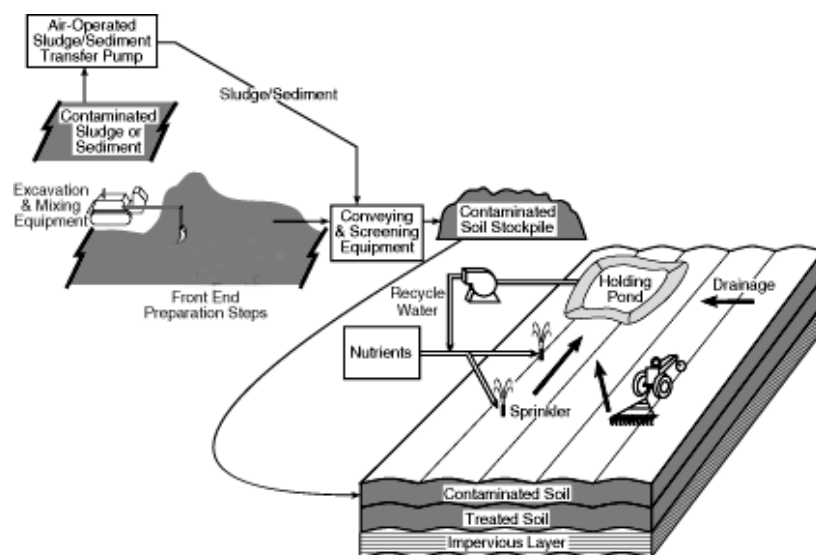


Figura A II. 1: Schema generale di un processo della tecnica di Biodegradazione Heap Pile (pile semplici) [<http://bdt.regionePuglia.it>]



4-11 64P-5121 8/22/94

Figura A II. 2: Biopile in fase solido - Soil Heaping (pile a strati sovrapposti) [<http://www.frtr.gov/matrix2/section1/list-of-fig.html>]

Biosparging

Luogo della bonifica	In Situ
Classe	Trasformazione
Matrice Ambientale	- Suolo saturo - Falda
Materiali Utilizzati	- Ossigeno - Nutrienti
Funzionamento	Immissione di aria nel terreno tramite aste infisse nel terreno.
Determinazioni Preliminari	- Respirimetria (potenzialità delle popolazioni presenti); - Permeabilità dei terreni; - Geometria della falda acquifera.
Obiettivo	Trattamento suoli saturi e delle falde.
Utilizzabilità	- Benzina - Gasolio - Oli combustibili
Limitazioni	Elevata concentrazione di idrocarburi tale da diminuire la permeabilità.

Bioventing

Luogo della Bonifica	In Situ
Classe	Trasformazione
Materiali Utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Serie di Pozzi - Ossigeno - Nutrienti Minerali
Matrice Ambientale	Suolo insaturo
Funzionamento	Immissione di aria nel terreno, tramite aste infisse nel suolo, per favorire l'attività vitale dei microrganismi (l'ossigeno contenuto nell'aria è un accettore di elettroni).
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Respirometria (potenzialità delle popolazioni presenti); - Permeabilità dei terreni; - Contenuto in acqua dei suoli; - Granulometria (alta umidità e granulometria fine sono sfavorevoli per la riuscita della bonifica con questa tecnica); - pH del suolo (deve essere compreso tra 6 ed 8)
Utilizzabilità	Idrocarburi di origine petrolifera (benzina, gasolio, olio combustibile). Solventi non clorurati.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Bassa permeabilità del suolo; - Suoli eterogenei; - Elevata concentrazione di inquinante che satura gli interstizi; - Contaminamento della zona a frangia capillare; - Può essere necessario un monitoraggio dei gas in uscita dal suolo; - La biodegradazione dei composti clorurati non è efficiente; - Suoli con un basso contenuto di umidità; - Basse temperature.
Costi	Dati da Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE): da \$ 10 a \$ 70 per m ³ .

Compostaggio

Luogo della bonifica	Ex Situ
Classe	Trasformazione
Matrice ambientale	Suolo
Materiali utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Superfici adeguate; - Tubi forati; - Materiali nutrienti; - Teli impermeabili; - Ammendanti.
Funzionamento	<p>Il compostaggio è un processo biologico controllato che consente di convertire i contaminanti organici in intermedi non tossici, mediante l'uso di microrganismi in condizioni aerobiche od anaerobiche. Durante il processo di degradazione la temperatura tende a crescere a causa del calore prodotto dai microrganismi nella biodegradazione. Dopo l'escavazione, il terreno deve essere mescolato ad ammendanti organici che hanno anche lo scopo di aumentare la porosità. Esistono due varianti impiantistiche: Cumuli Rivoltati e Biopile.</p>
Determinazioni preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Contenuto di acqua nel terreno; - Temperatura; - Presenza di materiale argilloso; - Concentrazione di sostanze nutrienti inorganiche; - Contenuto di ossigeno.
Utilizzabilità	<p>Composti organici:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alogenati volatili; - Alogenati semivolatili; - Non alogenati volatili; - Non alogenati semivolatili; - Policlorobifenili (PCB); - Pesticidi; - Diossine/Furani; - Cianuri organici; - Organici corrosivi. <p>Contaminanti inorganici:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Metalli (composti) volatili; - Metalli (composti) non volatili; - Amianto; - Materiali radioattivi; - Inorganici corrosivi; - Cianuri inorganici. <p>Contaminanti reattivi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ossidanti e riducenti.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Il compostaggio implica un aumento del volume del materiale, in quanto richiede l'aggiunta di materiali ammendanti; - Viene richiesto lo scavo del terreno che può

Appendice II

	<p>provare anche il rilascio di sostanze più volatili;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Possibilità di modifica del sito per la costruzione dell'impianto; - Presenza di sostanze tossiche per i microrganismi; - Potenzialità di produzione di residui del metabolismo tossici.
Costi	<p>I costi variano con la quantità di suolo trattato, la frazione di suolo nel compost, la disponibilità di ammendanti, il tipo di contaminante ed il tipo impianto impiegato. In maniera approssimativa i costi variano \$ 25.000 - \$ 75.000 per studi in laboratorio, \$ 10.000 - \$ 1.000.000 per test pilota, (\$ 6.5 - \$ 16.9 per m³) di terreno trattato.</p>

Contattori Biologici Rotanti

Luogo della Bonifica	Ex Situ
Matrice Ambientale	Falda: le acque devono essere estratte.
Materiali Utilizzati	Reattori biologici
Funzionamento	I microrganismi sono su supporti o vengono sospesi nel liquido. Un tipico reattore consiste in dischi plastici del diametro di 12 piedi (3,66 m) montati lungo un'asta lunga 25 piedi (7,62 m) e posta orizzontalmente nel liquido; il reattore viene fatto ruotare a 1,5 giri al minuto. Solo il 40% dei dischi sono immersi nell'acqua, il resto è a contatto con l'aria. I microrganismi degradano i composti organici ed azotati e producono diossido di carbonio, acqua e nuove cellule che formano i fanghi.
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo di immersione dei dischi nell'acqua; - Volume dei serbatoi da utilizzare; - Concentrazioni di metalli pesanti, pesticidi, erbicidi o molecole organiche altamente clorurate: nel caso siano molto alte, inibiscono l'attività microbica; - pH: deve essere compreso tra 6 e 8,5
Utilizzabilità	<ul style="list-style-type: none"> - Composti organici semi-volatili; - Idrocarburi; - Composti azotati.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Elevate concentrazioni di contaminanti: tossiche per la popolazione microbica; - Se si innescano reazioni di volatilizzazione dai fanghi attivi, l'atmosfera all'intorno potrebbe risultare fortemente contaminata; - Valori bassi di temperature ambiente: rallentano la velocità di biodegradazione; - Mancanza di ossigeno: induce una diminuzione del tasso di degradazione; - Contaminazione del reattore da microrganismi interferenti: riduzione dell'efficacia del metodo.

Fitorimediazione

Luogo della Bonifica	In Situ
Matrice Ambientale	Suolo
Materiali Utilizzati	Specie vegetali
Funzionamento	<p>Differenti specie vegetali sono utilizzate per l'estrazione e la distruzione dei contaminanti. Si basa su processi naturali condotti dalle piante:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estrazione di metalli e certi composti organici; - Accumulo e trasformazione dei composti accumulati via lignificazione, volatilizzazione, metabolizzazione e mineralizzazione; - Uso di enzimi per trasformare sostanze organiche complesse in composti più semplici. <p>Esistono varie tipologie di fitorimediazione:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rizofiltrazione: le radici svolgono un ruolo di adsorbimento, concentrazione e precipitazione dei metalli pesanti. - Fitoestrazione: accumulo ed estrazione dei contaminanti nei tessuti delle piante da raccolto. - Fitotrasformazione: le piante degradano le molecole organiche complesse in sostanze più semplici ed assimilabili dalle stesse. - Fitostimolazione: le radici rilasciano enzimi favorendo la degradazione microbica. - Fitostabilizzazione: le piante adsorbono i contaminanti, riducendone la mobilità e la migrazione nell'acquifero.
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometria; - Contenuto di acqua nel suolo: influenza la crescita delle piante e dei microrganismi e la disponibilità di ossigeno; - Temperatura: influenza notevolmente la fitorimediazione.
Utilizzabilità	<ul style="list-style-type: none"> - Metalli pesanti: Cd, Cr (VI), Pb, Co, Ni, Se, Zn; - Elementi radioattivi: Cs, Sr, U; - Solventi clorurati; - Policlorobifenili (PCB); - Idrocarburi policicloaromatici; - Pesticidi clorurati; - Insetticidi organofosfati; - Esplosivi.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Tempi lunghi; - Trattamento limitato a strati molto superficiali.
Costi	Variabile da \$ 17 a \$ 100 per acro (4.046,873 m ²).

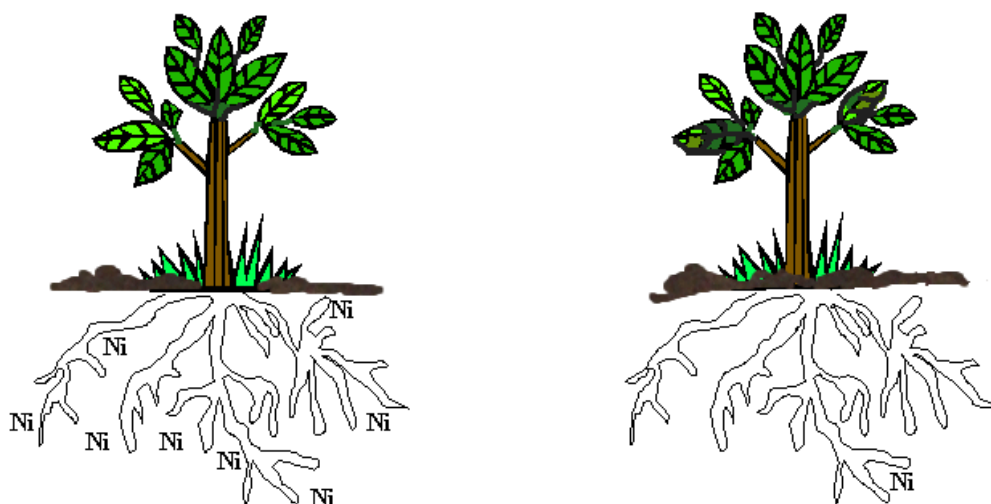


Figura A II. 3: Fitorimediazione [<http://www.frtr.gov/matrix2/section1/list-of-fig.html>]

Landfarming

Luogo della Bonifica	Ex Situ – On Site
Classe	Trasformazione
Matrice Ambientale	Suolo
Materiali Utilizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Area impermeabile su cui poter spargere il suolo contaminato; - Nutrienti a base di azoto e fosforo; - Attrezzature per il continuo rimescolamento del materiale inquinato; - Scaglie di legno da miscelare al suolo se poco permeabile; - Predisposizione di sistemi di drenaggio delle acque meteoriche in eccesso.
Funzionamento	Il suolo contaminato è posto in strati, dello spessore inferiore al metro e continuamente rimescolati per favorire gli scambi di ossigeno; l'attività dei microrganismi è favorita dalla introduzione di fertilizzanti a base di azoto e fosforo.
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Presenza di inquinanti volatili con pericoli per gli operatori e le popolazioni circostanti il sito; - Indisponibilità di ampie superfici.

Slurry Bioremediation o Bioslurry

Luogo della Bonifica	Ex Situ
Classe	Trasformazione
Matrice Ambientale	Suolo
Materiali Utilizzati	Fermentatore
Funzionamento	Il materiale viene posto in un reattore, denominato fermentatore e, tramite la continua modifica dei parametri che regolano le reazioni di degradazione (anche con l'immissione di popolazioni microbiche non autoctone, regolazione del pH e della temperatura), si velocizzano i processi di degradazione di sostanze particolarmente resistenti. Il suolo è inizialmente trattato per la separazione di corpi estranei o voluminosi.
Determinazioni Preliminari	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometria; - Solubilità degli inquinanti in acqua: se bassa, il processo è inapplicabile; - Temperatura: deve essere compresa fra 15°C e 35°C; - Contenuto in ossigeno: se bassa, il processo è inapplicabile; - pH: deve essere compreso tra 4,5 e 8,8; - Concentrazioni di metalli pesanti: sono tossici per i microrganismi.
Utilizzabilità	<p>Sostanze di difficile degradazione come:</p> <ul style="list-style-type: none"> - SVOCs alogenati e non alogenati; - VOCs alogenati e non alogenati; - Pesticidi; - Policlorobifenili (PCB).
Limitazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Alti costi; - Bassi volumi trattabili; - Produzione di scarichi gassosi o acquosi altamente inquinati.
Costi	Tra \$ 130 e \$ 200 per m ³

Bibliografia

Bibliografia legislativa:

- D. Lgs. n. 22/1997, Decreto Ronchi, del 5 febbraio 1997, “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/61/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”, (G.U. n. 38 del 15 febbraio 1997, Supplemento ordinario n. 33);
- Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1998, n. 72 “ Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi)”, pubblicato sul Supplemento ordinario alla Gazzetta ufficiale 16 aprile 1998 n. 88;
- Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999, n. 471, “Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell’articolo 17 del Decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) e successive modificazioni ed integrazioni” (SOGU n°293 del 15/12/99);
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 , “Norme in materia ambientale”, pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96.

Bibliografia scientifica:

- AMEK Società Cooperativa a R.L., “Proposta di sperimentazione propedeutica ad una biostabilizzazione aerobica per recupero dell’area di ripristino denominata “Fondo Colombarotto”, 2006;
- ANPA ed ONR, “Il recupero di sostanza organica dai rifiuti per la produzione di ammendanti di qualità”, Manuali e linee guida, n. 7, 2002;
- APAT e ONR, “Rapporto rifiuti 2006, Volume I – Rifiuti urbani”, 2006;
- ATO-R, “Smaltimento dei rifiuti urbani residui alla raccolta differenziata nel periodo transitorio 2009-2011. Ricognizione sulle possibilità di smaltimento nel territorio provinciale”, 2006;

- Bonoli A., “Parere sull’intervento in scala pilota e sperimentale di biostabilizzazione aerobica nel sito “Fondo Colombarotto”, 2006 (Imola);
- Boopathy R., “Factors limiting bioremediation technologies”, 2000;
- Brock D., “Microbiologia”, 1995;
- Caiazza M., Viselli R., “Rapporto Bonifiche Federambiente 2007”, 2007;
- Dall’Ara A., “Fondo Colombarotto” , “Risultati delle sperimentazioni *in situ* e Progetto di biostabilizzazione e recupero dell’Area ai fini agricoli”, 2007;
- Dall’Ara A. *et al.*, “Sistema di caratterizzazione di matrici organiche: fanghi di cartiera all’interno di ripristini ambientali”, 2007;
- Dall’Ara A., Ferri F., Marroni V., Billi L., Bonoli A., “Low impact bioremediation technology: application in a restoration site”, Proceedings Sardinia, 2009;
- Dermont G. *et al.*, “Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and a field applications”, Journal of Hazardous Materials, 2008, Vol. 152, pp 1-31
- Ferrari C., “I siti contaminati in Regione Emilia Romagna”, 2007;
- Grilli S. *et al.*, “Innovative low impact bioremediation technology in reducing explosion risk”, First International Conference on Hazardous Waste Management, Chania, 2008;
- Haugh R.T., “Compost engineering: Principles and practice”, Lanchaster-Basel Technomic, 1980; ;
- Il Sole 24 ORE ambiente&sicurezza, numero 21, Novembre 2007;
- Il sole 24 ORE ambiente&sicurezza, “Prontuario delle bonifiche”, 2007;
- Jadia C.D., Fulekar M.H., “Phytoremediation of heavy metals: recent techniques”, African Journal of Biotechnology, 2009, Vol. 8, pp 921-928;
- Jakobsen S.T., “Chemical reactions and air change during decomposition of organic matters”, Resources Conservation and Recycling, n°6, pp 259-266, 1992;

- Luo YM., “Current research and development in soil remediation technologies”, Progress in Chemistry, 2009, vol. 21, pp 558-565;
- Marabini S., “Relazione relativa allo stato di avanzamento dei lavori presso il sito Fondo Colombarotto”, 2007;
- Marques Ana P.G.C. *et al.*, "Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology", Critical Reviews in Environmental Science and Technology, n°39, pp 622-54, 2009;
- Marroni *et al.*, 2006, “Fondo Colombarotto: indagine e risoluzione in loco di sito contaminato da metano”. V Conferenza “Nuova normativa ed innovazione (Bio) tecnologica nella gestione e bonifica dei siti contaminati”. ECOMONDO 2006 pp. Atti di seminari, a cura di L. Morselli, Tomo 2, pp. 266-271;
- Marroni *et al.* “Contaminazione di un sito dedicato a recupero rifiuti. Caratterizzazione ed intervento *in situ*”, 2008;
- Owen W.F. *et al.*, “Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity”, Water Research, 13: 485-492, 1979;
- Pavel L.V., Gavrilesco M., "Overview of *ex situ* decontamination techniques for soil cleanup", Environmental Engineering and Management Journal, 2008, Vol. 7, pp 815-834+ Dall’Ara A. *et al.*, 2007. “Sistema di Caratterizzazione di matrici organiche: fanghi di cartiera all’interno di ripristini ambientali”.
- Pier P. A., Kelly J. M., “Measured and estimated methane and carbon dioxide emissions from sawdust waste in the Tennessee valley under alternative management strategies”, 1997;
- Sunarso J., Ismadji S., “Decontamination of hazardous substances from solid matrices and liquids using supercritical fluids extraction: a review”, Journal of Hazardous Materials, 2009, Vol. 161, pp 1-20
- Wolf-Rudiger, Irene Frommert, Ralf Jorg., “Standardized methods for anaerobic biodegradability testing”, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 3: 141-158, 2004;

Siti internet:

- <http://www.ambiente.it/impresa/legislazione/leggi/1998/dm5-2-98/allegato1/12fanghi.htm> (Dicembre 2007)
- <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2.html> (Ottobre 2007)
- <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch3.html> (Ottobre 2007)
- www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch4.html (Novembre 2007)
- www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch5.html (Novembre 2007)
- <http://www.bafu.admin.ch/index.html?lang=it> (Novembre 2007)
- <http://bdt.regionePuglia.it> (Novembre 2007)
- http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm (Novembre 2007)
- <http://www.contaminatedland.co.uk/site-inv/site-001.htm> (Settembre 2009)
- <http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp> (Ottobre 2007)
- <http://www.epa.gov/OUST/cat/REMEDIAL.HTM> (Settembre 2009)
- http://www.environmentagency.gov.uk/commondata/acrobat/lftgn07_surface_936575.pdf (Aprile 2008)
- <http://www.federambiente.it> (Settembre 2009)
- <http://www.federambiente.it/moduli/bonifiche/Vitali%20-20Imperiali%20-%20Martignon.PDF> (Ottobre 2007)
- <http://www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html> (Novembre 2007)
- <http://www.frtr.gov/matrix2/section1/list-of-fig.html> (Novembre 2007)
- <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html> (Novembre 2007)
- <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-7.gif> (Novembre 2007)
- <http://www.labservice.it> (Settembre 2009)
- <http://www.metea.uniba.it/database/tecnologie.htm> (Novembre 2007)
- http://www.provincia.torino.it/ambiente/filestorage/download/ato_r/pdf/ricognizione_impianti/cap_15-17.pdf (Luglio 2009)
- http://it.wikipedia.org/wiki/Limiti_di_esplosione (Gennaio 2008)

- <http://www.wikipedia.org> (Gennaio 2008)
- <http://it.wikipedia.org/wiki/Metano> (Dicembre 2007)

Documenti Amministrativi

- Ordinanza Contingibile ed Urgente del Comune di Imola, n. 1081, del 16/12/2005 (Prot. gen. 65299), avente come oggetto “Temporanea inagibilità dell’unità abitativa sita in Imola – Via Busa n. 11”;
- Ordinanza Contingibile ed Urgente del Comune di Imola, n. 1103, del 30/12/2005 (Prot. gen. 68235), avente come oggetto “Ordinanza contingibile ed urgente per fondo Colombarotto – Area assoggettata a ripristino ambientale”;
- Ordinanza Contingibile del Comune di Imola, n. 206, del 20/03/2006, avente come oggetto “Ordinanza contingibile ed urgente n. 5 per interventi urgenti nel fondo Colombarotto – Area assoggettata a ripristino ambientale”;
- Ordinanza Contingibile del Comune di Imola, n. 285, del 14/04/2006, avente come oggetto “Ordinanza contingibile ed urgente n. 6 per interventi urgenti nel fondo Colombarotto – Area assoggettata a ripristino ambientale”;
- Ordinanza Contingibile e Urgente Comune di Imola del 03/07/2006 (Prot. gen. 36710), avente come oggetto “Problematiche di biogas relative all’area assoggettata a ripristino ambientale con fanghi da industria cartaria denominata fondo “Colombarotto” – via Piratello Imola. Trasmissione verbale riunione del 09/06/2006”;
- Ordinanza Contingibile del Comune di Imola, n. 72, del 07/09/2006, avente come oggetto “Revoca dell’Ordinanza n. 1081 del 16/12/2005 - Temporanea inagibilità dell’unità abitativa sita in Imola , Via Busa n. 11”.

Tesi di laurea:

- Modarelli G., 2008, “*Sistemi di controllo di processi di biostabilizzazione in situ*”, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio, A.A. 2006/2007;

Immagini:

- Fabbri P., Febbraio 2008;
- Google Earth, Gennaio 2008;
- Google Earth, Febbraio 2008;
- Modarelli G., Febbraio 2008;
- Modarelli G., Virgallito G. (Microcreations), Marzo 2008.

Ringraziamenti

Innanzitutto desidero esprimere un ringraziamento enorme alla carissima **Prof.ssa Alessandra Bonoli** per avermi dato fiducia da subito, dalle lontane lezioni di “Ingegneria delle materie prime”, durante le quali mi sono appassionata al suo lavoro ed ho avuto la fortuna di incontrare un prezioso esempio da seguire, sia umano che professionale, ed un grande sostegno in tutti gli anni successivi fino ad arrivare a questo momento.

Il mio secondo grazie (“secondo” solo per questioni cronologiche di conoscenza!), carico di enorme stima ed affetto, va all’Ing. **Alice Dall’Ara**, a **Giuliano Tazzari** ed all’Ing. **Nora Rappoli** per avermi dato la possibilità di collaborare con loro, per la compagnia nelle giornate di monitoraggio e per avermi seguito in ogni altra fase di questo mio cammino spronandomi a dare il massimo e supportandomi nelle difficoltà; grazie perché, pur rispettando sempre i miei tempi universitari, mi hanno considerato non solo come una studentessa a cui attribuire il soprannome di “Agitelli”, ma soprattutto come una risorsa importante per il loro lavoro e a cui trasferire le loro competenze. In particolare, grazie ad Alice, per l’attenta revisione della tesi.

Grazie anche all’Ing. **Federica Ferri**, per la disponibilità, la gentilezza e la generosità da subito mostrata nei miei confronti, senza mai risparmiarsi e valorizzando il mio lavoro con tanta fiducia.

A tutti loro desidero infine esprimere la mia gratitudine per la pazienza mostrata nei miei confronti (che spesso invece non sono una persona paziente), e la mia volontà di continuare con lo stesso impegno di questi anni per mettere in pratica al meglio tutte le conoscenze acquisite e per imparare sempre di più, nel rispetto di tutti quei valori che ci legano.

E poi:

grazie.....

ai miei genitori, perché le loro scelte di vita ed i loro sacrifici mi hanno permesso di giungere a questo traguardo, mai con fatica, ma sempre con la gioia, la serenità e la tranquillità di poter contare sul loro affetto incondizionato e sul loro aiuto, trasmettendomi il senso del dovere, della fatica e del rispetto di ogni persona;

“alla mia sorella” (come diciamo noi in Romagna) **Robi**, perché la sua presenza, anche da lontano, e la contemporaneità con cui abbiamo vissuto ogni momento importante o difficile sono state l’aiuto più prezioso per affrontare tutto con più facilità...vabbè, e poi grazie al fatto che posso sempre contare su una socia di stupidaggini e idiozzia, soprattutto nelle conversazioni su Skype in mezzo ad altre persone che non capiscono perché lo schermo del pc faccia tanto ridere (!!!);

a **Paolo**, che è entrato quatto quatto nella mia vita e si è “guadagnato” ogni pezzettino del mio cuore, permettendomi di affrontare ogni cosa in modo felice e sereno...grazie per essermi stato vicino nei momenti di fatica, aiutandomi con pazienza e generosità ma anche spronandomi e credendo in me più di ogni altro, nei momenti di gioia e di svago, nelle partite vittoriose dell’Inter (!!!!), ed anche in quelle di disfatta....grazie perché mi dà la voglia di fare e di vivere con ottimismo e determinazione e mi ha permesso di unire i miei obiettivi ai suoi;

a tutti i miei amici conosciuti in università, che sono entrati nella mia vita in questi ultimi sei anni e di cui non potrei più fare a meno....cominciamo e speriamo di non dimenticare nessuno (!!!!):

alla **Sara** (vabbè dai....Focaccina) e a **Fra**, che conoscono ogni lato di me, e nonostante questo mi vogliono bene!!!! Grazie a loro perché, in momenti in cui mi sembrava che niente andasse bene, sono stati la mia forza e mi hanno aiutato semplicemente con la loro presenza...e poi anche perché, nei momenti in cui va tutto bene e sono felice, sono i miei soci di chiacchiere, scemenze e divertimento...grazie alla mia “Amica Focaccina” per essersi avvicinata a me e per fare della nostra diversità un elemento di forza, per le lunghe abbracciatone finché non smettevo di piangere, per i lunghi momenti di confidenze in cui ci si prosciuga la lingua, e poi per tutti i momenti di divertimento(!!!!)...e grazie a Fra

per avermi reso parte del suo mondo e volermi sempre con lui in ogni momento...ah sì, e per farmi da autista (!!!!!);

a **Teo** e **Dani**, che sono i miei fratelloni acquisiti, perché ogni tanto vengono a meno al loro lato scherzoso e mi dicono che mi vogliono bene! Grazie perché la loro presenza vicino mi ha sempre impedito di “cuccare” (!!!), così potevo stare tranquilla pensando ai miei amici, e perché poi quando è arrivata la persona giusta per me l’hanno capito subito e mi sostengono sempre;

alle mie due sorelle preferite, **Mari** e **Ross**, che sono le uniche ad avermi definito “piccola” e “dolce” (!!!), perché so che mi vogliono tanto bene e che posso sempre contare su di loro....grazie per avermi regalato la loro generosità, la loro compagnia e mi hanno fatto conoscere il loro mondo;

alla mia compagna di camminate **Ila**, che mi ha fatto risparmiare anni di autobus e mi ha allietato il tragitto a piedi verso ingegneria (!!!!)....grazie per le piccole confidenze (che, visto il carattere, erano grandi!), e grazie per avermi dimostrato il dispiacere di certi momenti in cui c’era qualcuno che si approfittava della mia generosità, e per avermi convinto che non era un difetto ma una parte bella di me;

a **Marta**, che quando cinque anni fà vide la mia casa-tugurio bolognese se ne innamorò, così quando la vita lì era insopportabile mi facevo coraggio (!!!!);

a **Veri**, che anche senza facebook è mio amico e mi informa comunque delle cose in altri modi (ah ah!)...e mi fa sempre tanti complimenti (!!!)...e poi come farei senza le sue lezioni di politica (!!!);

a **Lollo**, che da quando ho internet è diventato socio di stupidaggini al pc, e che mi ha dato la forza di fare la tirata in certi esami che proprio non volevo fare (!!!);

e poi grazie a **Bea, Daniela, Giacomo, Davide, Manu, Vera, Francesca, Alma, Scarpo, Andrea, Mancio**;

grazie alla mia amica **Ili**, perché è una presenza importante nella mia vita indipendentemente da quante volte ci si vede e perché mi fa sembrare più bella la vita a Forlimpopoli;

e grazie alle esperienze negative e di sofferenza di questi ultimi anni, perché dall’incontro con persone negative non mi sono fatta mettere i bastoni fra le ruote nel raggiungimento dei miei obiettivi ma ne sono uscita più forte!!!!

E finalmente posso scrivere....

Fine!!!!!!